



Universidad  
Carlos III de Madrid  
[www.uc3m.es](http://www.uc3m.es)

Grado en ingeniería en tecnologías industriales  
Curso 2016-2017

*Trabajo Fin de Grado*

# Diseño y adaptación de carga de pago para UAV ligero

**Autor: David Sastre Albella**

Tutor interno: Raquel Gómez Miguel  
Tutor externo: David Lamas Hernández

*Madrid, Octubre 2016*



# *I-RESUMEN*

En este trabajo se ha abordado la actualización de la carga de pago ya existente en el UAV Mantis de Indra Systems, un UAV ligero de reconocimiento cuya carga de pago es un sistema para captar imágenes del entorno y enviarlas a tierra donde los operadores puedan procesarlas. La actualización consiste en mejorar lo máximo posible la calidad de imagen captada por el UAV, respetando las limitaciones de espacio y peso existentes en la plataforma.

Para conseguir este objetivo se ha adaptado la tecnología de *gimbal brushless* usada en estabilizadores de cámaras para multirrotores de gran tamaño y en estabilizadores de cámara de grabación profesional, reduciendo todo lo posible su tamaño, peso e impacto aerodinámico en el UAV.

Debido a que tanto los medios como el tiempo eran limitados se optó por reutilizar parte de los componentes de la carga útil de la que se parte y realizar el trabajo de forma iterativa para consolidar los cambios que se iban realizando durante el desarrollo.

Una vez estudiados los fundamentos teóricos para la introducción de la nueva tecnología, se han desarrollado y construido dos prototipos. En el primero se mantienen los dos ejes de la gimbal de la carga útil de la que se parte, pero se sustituyen los servos de control por dos motores *brushless*. Este cambio lleva aparejado la adaptación de la carcasa, el cambio completo de la electrónica de la carga de pago para el control de estos motores, y además se introduce una placa de desarrollo con un microchip de 32 bits donde se ha implementado el software de control. Se comprobó que una gran mejora en la calidad de las imágenes siempre que se trabajara en el punto de equilibrio de la cámara, pero al alejarse de este punto se perdía el control.

Para corregir los problemas que se mantenían en el primer prototipo se optó por añadir un nuevo eje al *gimbal*. De nuevo hubo que modificar la carcasa para albergar al tercer motor que controla el nuevo eje, así como adaptar la electrónica y el software de control para poder controlar también el tercer eje. Con este prototipo se pudo verificar que el uso de esta tecnología mejora notablemente la estabilidad de la imagen evitando además los problemas que plantea el uso de servos para este fin.

Una vez demostrado que el uso de esta tecnología es viable en el UAV Mantis se ha fabricado el modelo final según los cánones de fabricación de Indra Systems y actualmente está en fase de control de calidad.

## II-PALABRAS CLAVE

**-Carga de pago:** Es la capacidad de carga de una aeronave destinada a albergar cualquier mercancía o sistema que hacen útil la existencia de la misma. Esta carga de pago puede consistir en equipos de medición en el caso de una aeronave con fines científicos, en tripulación, o en armamento en el caso de una aeronave militar.

**-Gimbal:** Es un dispositivo consistente en un soporte y una parte móvil que permite pivotar un objeto alrededor de un eje de rotación. Combinando varios *gimbal* de forma sucesiva se puede conseguir rotar un objeto de tal modo que se pueda obtener cualquier orientación en el espacio tridimensional. El término *gimbal* también se usa comúnmente para denominar al conjunto de varios *gimbal*, a los que se denominan ejes. De este modo a un conjunto de tres *gimbal* combinados se le llama comúnmente *gimbal* de tres ejes.

**-Motor *Brushless*:** Literalmente traducido del inglés significa “motor sin escobillas”. Los motores eléctricos tradicionales de corriente continua necesitaban transmitir corriente a la parte móvil del motor en todo momento. Esto se hacía mediante unas pestañas fijas que están en continuo contacto con el eje móvil del motor, alimentando a las bobinas que giran solidarias con dicho eje. Al existir rozamiento entre dichas pestañas y el eje móvil, se pierde mucha eficiencia en calor, y el pobre contacto eléctrico entre ambas partes tampoco favorece a la eficiencia del motor. En un motor sin escobillas se eliminan estas pestañas, conmutando la corriente de forma electrónica, y dejando la parte de las bobinas fija. En la parte del rotor se utilizan imanes permanentes, de este modo no es necesario transmitir corriente entre ninguna parte fija y móvil, aumentando considerablemente la eficiencia del motor.

**-Ángulos de Euler:** Consisten en un conjunto de tres coordenadas angulares ortogonales entre sí mediante las cuales se puede describir cualquier orientación en el espacio de un objeto con respecto a un sistema de referencia fijo. El nombre de éstos ángulos hace honor al matemático y físico suizo Leonhard Euler quien fue el primero en introducirlos.

**-Yaw, roll y pitch:** Son una forma de identificar a cada una de las tres coordenadas de Euler. Si nos refiriésemos a estos ángulos para identificar la orientación de nuestra cabeza, *yaw* consistiría en el ángulo resultante al mirar a izquierda y derecha, *pitch* consistiría en el movimiento de mirar arriba y abajo, mientras que *roll* se referiría a inclinar la cabeza hacia los lados, a girar la cabeza sobre un eje de rotación que saliese de nuestra nariz. Esta denominación para los ángulos de Euler se usa comúnmente en aeronáutica para describir la orientación de las aeronaves.

# III- ÍNDICE

<b>1-Índice de figuras</b>	<b>7</b>
<b>2-Lista de acrónimos</b>	<b>11</b>
<b>3-Introducción</b>	<b>13</b>
<b>3.1- Justificación</b>	<b>14</b>
<b>3.2- Objetivo</b>	<b>15</b>
<b>3.3- Metodología y planificación</b>	<b>16</b>
<b>4-Antecedentes</b>	<b>18</b>
<b>4.1- Estado del arte</b>	<b>18</b>
<b>4.2- Presentación del UAV Mantis de Indra Systems</b>	<b>25</b>
<b>4.3- Carga de pago previa a este proyecto</b>	<b>28</b>
<b>5-Fundamentos teóricos</b>	<b>30</b>
<b>5.1-Fundamentos geométricos: Ángulos de Euler en gimbal</b>	<b>30</b>
<b>5.2-Fundamentos eléctricos: Motores BLDC</b>	<b>36</b>
<b>5.3-Fundamentos electrónicos:</b>	<b>43</b>
5.3.1-Control de motores BLDC	43
5.3.2-IMU, Inertial Measurement Unit	53
<b>5.4-Fundamentos de control: Controlador PID</b>	<b>55</b>

<b>6-Desarrollo de prototipos y resultados</b>	62
<b>6.1-Versión en 2 ejes</b>	63
6.1.1-Proceso de construcción	63
6.1.2-Resultados obtenidos y posibles mejoras	87
<b>6.2-Versión en 3 ejes</b>	89
6.2.1-Proceso de construcción	89
6.2.2-Resultados obtenidos y posibles mejoras	97
<b>7-Modelo final</b>	98
<b>8-Conclusiones</b>	101
<b>9-Bibliografía</b>	104

# 1- ÍNDICE DE FIGURAS

-Figura 1. Servo analógico de la compañía EMAX

-Figura 2. Una de las primeras gimbal profesionales para fotografía aérea con sistema de estabilización mediante servos, el modelo invincible rabbit de TAROT RC

-Figura 3. gimbal brushless “de mano” para grabación profesional. Modelo Ronin de DJI

-Figura 4. Vista del UAV Mantis desde el plano de cola

-Figura 5. Vista del UAV Mantis desde el extremo de un ala

-Figura 6. Vista frontal del UAV Mantis, donde se puede observar la carga de pago antigua

-Figura 7. Ángulos de Euler y sus correspondientes ejes

*“Euler (gimbal lock) Explained” The Guerilla CG Project, Canal de youtube.*

-Figura 8. Explicación de *gimbal lock*

*“Euler (gimbal lock) Explained” The Guerilla CG Project, Canal de youtube.*

-Figura 9. Explicación de *gimbal lock*

*“Euler (gimbal lock) Explained” The Guerilla CG Project, Canal de youtube.*

-Figura 10. Explicación de *gimbal lock*

*“Euler (gimbal lock) Explained” The Guerilla CG Project, Canal de youtube.*

-Figura 11. Explicación de *gimbal lock*

*“Euler (gimbal lock) Explained” The Guerilla CG Project, Canal de youtube.*

-Figura 12. Esquema de fases en un motor BLDC

*“Brushless DC Motors & Control - How it Works” DigitalPimple, Canal de youtube.*

-Figura 13. Esquema de las fuerzas de repulsión y atracción magnéticas en un motor BLDC en funcionamiento

[“Brushless DC Motor, How it works ?” Learn Ingeniering, Canal de youtube.](#)

-Figura 14. Esquema de como se conmutan las fases para una rotación continua en un motor BLDC

[“Introduction to InstaSPIN™-BLDC Motor Control Solution” Texas Instruments](#)

-Figura 15. Medición de la BEMF en un osciloscopio

[“So, Which PWM Technique is Best”, Dave Wilson, Texas instruments](#)

-Figura 16. Gráfico de Como varía la corriente, voltaje, y el paso por cero de las fases de un motor BLDC.

[“Using the PIC18F231 for sensorles BLDC control” Padmaraja Yedamale, Microchip Technology Inc.](#)

-Figura 17. Comparación de la corriente en cada una de las fases A, B y C durante una revolución eléctrica en un motor BLDC según el metodo en 6 fases (inferior) o senoidal (superior).

[electronics.stackexchange.com, Russel McMahon, Foro de electrónica.](#)

-Figura 18. Variación del ancho de pulso o *duty cycle* de una señal PWM.

[electronics.stackexchange.com, Russel McMahon, Foro de electrónica.](#)

-Figura 19. Modulación de una señal PWM para obtener un valor eficaz senoidal

[electronics.stackexchange.com, Russel McMahon, Foro de electrónica.](#)

-Figura 20. *Half H bridge*.

[“Cd-Rom 3 phase Sensored BLDC Motor Arduino Controller” elecnote.blogspot.com](#)

-Figura 21. Posibles caminos que sigue la corriente a través de las fases en un motor BLDC.

[“Tackling the Brushless DC Motor Experience” ebldc.com](#)



-Figura 22. Secuencia de conmutación de las fases en un motor BLDC.

[“Tackling the Brushless DC Motor Experience” ebldc.com](#)

-Figura 23. Esquema de como se conmutaría el *half H bridge* para una secuencia de control.

[“Tackling the Brushless DC Motor Experience” ebldc.com](#)

-Figura 24. Componentes de la aceleración medidas con un acelerómetro

[“Accelerometer sensor”, developer.tizen.org](#)

-Figura 25. Diagrama de bloques del regulador PID del autopiloto Px4 de ETH Zurich.

-Figura 26. Carga de pago antigua sin la tapa externa

-Figura 27. Estructura de la *gimbal* de la carga de pago antigua

-Figura 28. Detalle de la bancada del motor de *pitch*.

-Figura 29. Detalle del espacio entre la parte móvil y la parte fija de la carga de pago.

-Figura 30. Detalle del emplazamiento del motor de *roll*.

-Figura 31. Detalle de los lugares plomados para equilibrar la *gimbal*.

-Figura 32. Vista de la carga de pago con la electrónica montada.

-Figura 33. Vista de la carcasa desde arriba donde se puede apreciar el poliuretano y el poliestireno expandido añadido, tras darles forma.

-Figura 34. Vista lateral donde se puede apreciar el ajuste de la parte inferior a la carcasa esférica.

-Figura 35. Detalle del volumen de la carcasa para albergar el motor de *roll*

-Figura 36. Detalle de la aplicación de fibra de vidrio en la parte inferior de la carcasa.

-Figura 37. Detalle de la eliminación de la carcasa vieja por partes.

-Figura 38. Detalle de la eliminación completa de la carcasa antigua que ya no es de utilidad.

- Figura 39. Detalle de como ha quedado el interior de la nueva carcasa tras eliminar el poliuretano que le dió forma durante la aplicación de fibra de vidrio.
- Figura 40. En esta imagen se puede observar donde se ha aplicado la masilla para sujetar la sección que soportará el motor de *roll*, así como la fibra de vidrio adicional para ajustar correctamente con la carcasa esférica de la *gimbal*.
- Figura 41. Detalle de la cinta desmoldeante aplicada a modo de “molde” para los laterales de la carcasa durante el curado del material aplicado.
- Figura 42. Detalle de la marca previa a la eliminación de la fibra sobrante.
- Figura 43. Vista lateral de la carcasa tras aplicar masilla de poliéster, antes del lijado.
- Figura 44. Detalle de las diferentes capas de fibra de vidrio aplicadas.
- Figura 45. Detalle del proceso de conformación del ajuste entre la tapa del motor de *roll* y la carcasa.
- Figura 46. Prototipo ya pintado y montado en el UAV durante el proceso de implementación.
- Figura 47. Detalle de la construcción de las escuadras que conformarán la estructura de la *gimbal*.
- Figura 48. Estructura de la *gimbal* presentada en su lugar final.
- Figura 49. Parte inferior de la carcasa conformada en poliestireno expandido y presentada antes de aplicar la fibra de vidrio.
- Figura 50. Detalle de la inclinación de la cúpula que cubrirá la *gimbal*.
- Figura 51. Parte inferior de la carcasa en poliestireno expandido presentada junto a la cúpula transparente.
- Figura 52. Prototipo de tres ejes completamente acabado y montado, listo para funcionar.
- Figura 53. Esquema orientativo de los principales componentes y conexiones de la carga de pago final

## 2- LISTA DE ACRÓNIMOS

**-UAV:** *Unmanned Aerial Vehicle*, vehículo aéreo no tripulado.

**-UAS:** *Unmanned Aerial System*, sistema aéreo no tripulado. Comprende al UAV y todos los sistemas necesarios para su operación.

**-GDT:** *Ground Data Transmission*, sistema de transmisión de datos de tierra. Se refiere a los sistemas del UAS encargados de intercambiar información con el UAV colocados en tierra.

**-GCS:** *Ground Control Station*, estación de control de tierra. Se refiere a los sistemas del UAS dedicados al control del/los UAV, así como la interfaz que hace posible la interacción del sistema con los operadores.

**-Motor BLDC:** *Brush Less Direct Current*, motor sin escobillas de corriente directa. Es un tipo concreto de motor *brushless* en el que su control se realiza conmutando directamente de forma electrónica cambios de corriente en sus bobinas para producir su rotación. Se llama de corriente continua porque esta conmutación de la corriente se hace a partir de una corriente continua, que se trata a través de circuitos electrónicos para convertirla en alterna trifásica y poder operar el motor.

**-BEMF:** *Back Electromotive Force*, fuerza retroelectromotriz. En un motor BLDC, se llama BEMF a la corriente inducida en sus bobinas por el propio movimiento de los imanes permanentes del rotor en torno a éstas, por el principio de la ley de Faraday. Esta corriente inducida es medida por un circuito de control y se usa para conocer la posición angular relativa entre la parte móvil y la parte fija del motor, y de este modo poder conmutar en el momento adecuado el cambio de corriente para que el motor funcione correctamente.

**-IMU:** *Inertial Measurement Unit*, unidad de medida inercial. Es un dispositivo formado por varios sensores para conocer la orientación o incluso posición en el espacio de un objeto. Los más simples, con seis grados de libertad, poseen un giróscopo y un acelerómetro, ambos de tres ejes. El giróscopo mide velocidades angulares en los tres ejes del espacio, mientras que el acelerómetro mide la posición angular del objeto con respecto a la Tierra, midiendo para ello el sentido de la fuerza de la gravedad. Con estos dos sensores, y con ayuda de un algoritmo que filtre la información recogida por los mismos, es posible conocer la orientación del objeto en todo momento con respecto a la Tierra.

**-PWM:** *Pulse width modulation*, modulación de ancho de pulso. Es un tipo de señal analógica consistente en una sucesión constante de pulsos, en la que el valor de la misma está determinado por el tiempo que los pulsos permanecen en estado alto o bajo, es decir, por el “ancho” de dichos pulsos.

### 3- INTRODUCCIÓN

El desarrollo de este proyecto se ha hecho en el departamento de vehículos aéreos no tripulados de la empresa Indra Systems. A principios del 2015 tuve la oportunidad de entrar a trabajar aquí como piloto de pruebas para los UAV que desarrollan, y una vez dentro empecé a desempeñar también funciones de desarrollo en este departamento. Hacía ya mucho tiempo que era aficionado al aeromodelismo, y siempre he estado muy en contacto con todos los avances tecnológicos en el sector de los UAV. Cuando conocí el sistema Mantis me di cuenta de que se podía mejorar notablemente su calidad de imagen, así que propuse este proyecto a mis jefes y me dieron una oportunidad para desarrollar mi idea, mediante un contrato de proyecto de fin de carrera para llevarlo a cabo. Tras finalizar el contrato de proyecto de fin de carrera sigo trabajando ya como plantilla de la empresa en los proyectos Mantis y Pelicano.

Esta empresa se dedica a llevar a cabo soluciones tecnológicas de lo más diversas, y aunque es de origen español tiene proyectos y desarrolla actividades por todo el mundo.

En el sector de los UAV, esta empresa es una de las más importantes en el panorama nacional, y su UAV Mantis es de los vehículos aéreos no tripulados más competentes de su categoría.

Aunque este proyecto ha sido todo un éxito, el modelo final todavía no se ha mostrado al público. En el momento de entregar esta memoria todavía se están pasando diversos controles y certificaciones a la carga de pago desarrollada, por este motivo no se pueden mostrar fotos del modelo final, aunque sí se mostrarán fotos y la descripción de todos los prototipos de los que se obtuvo el conocimiento para llevar a cabo el modelo definitivo.

Del mismo modo, como este proyecto de fin de grado se ha desarrollado en el ámbito de una empresa privada, y en un sector tan dinámico y competente como el de los UAV, hay algunos datos de carácter técnico que no ha sido posible incluir en esta memoria, tanto del UAV Mantis como de la carga de pago desarrollada.

### 3.1- JUSTIFICACIÓN

El primer *gimbal* montado en la carga de pago de Mantis utilizaba servos para controlar la estabilización mecánica de la cámara de recogida de imágenes. Estos dispositivos son relativamente eficientes siempre que no estén sometidos a cargas bruscas o vibraciones que desestabilicen el UAV en exceso.

Un UAV ligero como el Mantis se ve muy afectado por las cargas aerodinámicas a las que está sometido con respecto a una aeronave de mayor tamaño, lo que se traduce en video de mala calidad si no se usa un sistema de estabilización de imagen adecuado.

El sector de los UAV ligeros se nutre de los desarrollos llevados a cabo en aeromodelismo. Por esta razón se pensó que sustituir este gimbal por un gimbal que sustituye los servos por motores brushless, y que ya ha sido utilizado con éxito en multicopteros y helicópteros de fotografía aérea con buenos resultados, podría mejorar la calidad de las imágenes obtenidas. Esta decisión era un reto puesto que los UAV ligeros de ala fija están sometidos a turbulencias, cargas aerodinámicas y limitaciones de espacio y peso a las que no están sometidos los aeromodelos de ala rotatoria en los que se han utilizado este tipo de *gimbals* anteriormente.

### 3.2- OBJETIVO

El objetivo perseguido con la actualización de la carga de pago de este UAV es mejorar notablemente la calidad de la imagen recogida por el mismo y recibida e interpretada por los operadores del UAS.

Para llevar a cabo esta actualización se planteará desde cero el problema, y se tomarán avances tecnológicos de la grabación cinematográfica y de la fotografía aérea, y se intentarán fusionar con armonía en este UAV, respetando las restricciones presentes en una aeronave de este tipo como el peso, el espacio y el impacto aerodinámico.

Con esta actualización se pretende conseguir una carga de pago que sea capaz de estabilizar la imagen de tal modo que el apuntamiento permanezca completamente inmóvil, independientemente de que el UAV se mueva como consecuencia de perturbaciones atmosféricas. Además, deberá comunicarse de forma eficiente con el autopiloto ya que éste será el que la gobierne puesto que en la mayoría de las ocasiones los apuntamientos de la cámara se gestionan de forma automática, referenciándolos por coordenadas o por seguimiento de objetivo.

Básicamente se necesita que la cámara de la carga de pago sea completamente inmune a los movimientos del UAV, y se comporte como una cámara cuya orientación permanece absolutamente inmóvil frente a perturbaciones externas. Se necesita abstraer por completo la estabilización de la cámara del conjunto del UAV, delegando al autopiloto la única función de mandar órdenes de apuntamiento, sin preocuparse en absoluto de la estabilización.

### 3.3- METODOLOGÍA Y PLANIFICACIÓN

Para llevar a cabo este proyecto en primer lugar se estudiaron las soluciones comerciales que más se acercaban al objetivo buscado. Las soluciones comerciales que cumplen dichos objetivos son los sistemas de estabilización de cámaras *gimbal brushless* usados en grabación profesional y en fotografía aérea. En estas aplicaciones no existen apenas restricciones de peso y espacio, y menos aún aerodinámicas.

De este modo, lo primero que se hizo fue plantear el problema de la estabilización desde cero, desarrollando los fundamentos teóricos que rigen estas *gimbal brushless*, para poder plantearlo de nuevo con las restricciones presentes en este UAV. Una vez planteados unos fundamentos teóricos básicos, se procedió a llevarlos a la práctica. Tras observar los fallos de llevar a la práctica el modelo teórico, se formularon de nuevo planteamientos teóricos corregidos o ampliados, para volver a llevarlos a la práctica, iterando este proceso hasta la versión final.

En esta memoria se exponen de forma ordenada primero los planteamientos teóricos y posteriormente la construcción de los prototipos, pero estas dos partes realmente estuvieron muy interconectadas entre sí, y el desarrollo teórico se realimentaba constantemente de los avances obtenidos en los desarrollos prácticos.

Antes de la versión final se construyeron dos prototipos. El último prototipo se construyó partiendo del prototipo anterior, y el primer prototipo se planteó a partir de la carga de pago ya existente en el UAV Mantis. Para la elaboración de la mecánica de los prototipos se ha optado por técnicas tradicionales de construcción con materiales compuestos, a pesar de disponer en la empresa de tecnologías mucho más modernas para trabajar con este tipo de materiales. El motivo de elegir técnicas más tradicionales y menos tecnológicas es la facilidad y la escasa necesidad de medios necesarios para construir piezas con estas técnicas. Esto se traduce directamente en rapidez de construcción, lo cual es mucho más importante en un prototipo que el mejor acabado que se obtendría usando métodos modernos, puesto que su principal función es simplemente comprobar que la idea del diseño es factible.

El software que gobierna esta carga de pago también ha ido evolucionando constantemente y realimentándose enormemente del desarrollo práctico. Por el mismo motivo por el que no es posible incluir detalles técnicos o fotos del modelo final, no ha sido posible incluir información sobre el código en esta memoria. No obstante, en el apartado



de fundamentos teóricos se puede obtener una idea muy buena de la forma que debería tomar este software.

A pesar de que Indra es una empresa con muchos medios y el proyecto Mantis dispone de unos recursos económicos muy buenos, antes de lanzar un modelo final a producción con las consecuencias económicas que conlleva es necesario asegurarse de que va a merecer la pena. Por eso, el fin estos prototipos es básicamente demostrar que la idea funciona para que se conceda el presupuesto necesario para realizar el modelo final y se justifique todo el presupuesto necesario para diseñar los planos y el proceso de fabricación.

A continuación se presenta un cronograma orientativo del proceso seguido organizado en trimestres.

1º trimestre 2015	2º trimestre 2015	3º trimestre 2015	4º trimestre 2015	1º trimestre 2016	2º trimestre 2016
- Entrada a la empresa y familiarización con el UAS Mantis.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Proposición y aprobación de este proyecto.</li> <li>- Estudio de soluciones comerciales de cargas de pago para UAV de reconocimiento.</li> <li>- Estudio de tecnologías <i>brushless gimbal</i> de otros sectores.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Planteamiento de los primeros fundamentos teóricos.</li> <li>-Construcción del primer prototipo en dos ejes.</li> <li>-Elaboración del primer software básico de control.</li> <li>-Pruebas con el primer prototipo en dos ejes.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Reajuste del planteamiento teórico del problema.</li> <li>-Construcción del segundo prototipo, con tres ejes.</li> <li>-Pruebas con el segundo prototipo</li> <li>-Reajuste del software de control.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Verificación de la viabilidad del sistema.</li> <li>-Lanzamiento oficial de la actualización de la carga de pago, a nivel interno en la empresa.</li> <li>-Primeras versiones definitivas listas para empezar a probar y certificar.</li> </ul>	-Pruebas y certificaciones de las nuevas cargas de pago.

## 4- ANTECEDENTES

### 4.1- ESTADO DEL ARTE

En este tamaño de aeromodelos tradicionalmente se han usado servos para gobernar todas las partes móviles que gobiernan el vuelo. Estos servos consisten simplemente en un sistema realimentado en el que un pequeño motor eléctrico mueve un eje de salida, a través de una reductora para aumentar su par. En dicho eje de salida se encuentra un encoder o sensor de posición angular, la cual realimenta al motor para mantener el servo en la posición deseada.



Si bien estos dispositivos cumplen su función a la perfección a la hora de gobernar superficies móviles, así como mecanismos en el caso del servo que gobierna el gas en un UAV con motor a explosión, o los que gobiernan el plato cíclico y la cola en el caso de un helicóptero, tienen algunas limitaciones que pueden hacer el dispositivo inadecuado para su uso en la estabilización de imagen.

*Figura 1. Servo analógico de la compañía EMAX*

Una de estas limitaciones es la velocidad. Aunque algunos tipos de servos de alto rendimiento pueden llegar a velocidades de hasta 60 grados de rotación en 0,03 segundos, en ocasiones no es suficiente para contrarrestar a la perfección una perturbación fuerte en la actitud del aeromodelo. En servos tan rápidos se puede llegar a obtener un funcionamiento aceptable en situaciones normales, pero ante perturbaciones fuertes y rápidas no son capaces de mantener la actitud de la cámara completamente estable. Aunque sea por muy poco, un error de más de 5 grados es excesivo para obtener una buena calidad de imagen. Puede que parezca despreciable, pero en situaciones con mucho viento, o con atmósfera inestable estos pequeños UAV se sacuden muy bruscamente y este pequeño error puede hacer que la imagen tenga una calidad tan mala que no se pueda obtener apenas información de ella de forma cómoda y rápida.

Otra limitación importante de los servos para su uso en la estabilización de una cámara es que tienen una reductora conformada por varios piñones. Una reductora, por muy precisas que sean sus tolerancias y por muy minuciosamente que esté montada siempre tendrá un poco de holgura, o ésta acabará apareciendo según se vayan rodando sus engranajes. En servos de buena calidad esta holgura es mínima, pero al tener tantos piñones es apreciable al tacto en el eje de salida y por muy poca que sea esta holgura es un error más que se acumula en el sistema de estabilización.

Aun así, los primeros sistemas de estabilización mecánica de imagen usaban servos. Montaban servos de buena calidad y con la transmisión externa a éstos a través de una correa, para evitar en la medida de lo posible holguras adicionales. Estos sistemas mecánicos de estabilización de imagen se llaman comunmente *gimbals*. Los primeros en aparecer estaban destinados a un uso como carga de pago en multicopteros para filmación aérea, o topografía.



*Figura 2. Una de las primeras gimbal profesionales para fotografía aérea con sistema de estabilización mediante servos, el modelo invincible rabbit de TAROT RC*

Estos dispositivos poseen una IMU (*Inertial Measurement Unit*) que mide las aceleraciones y velocidades angulares en los tres ejes del espacio de la aeronave, las cuales envía a un microprocesador el cual gestiona las operaciones necesarias para mandar las señales a los servos de tal modo que corrijan sus posiciones angulares para intentar mantener la actitud de la cámara estable, contrarrestando los movimientos de la aeronave.

Este sistema es aceptable en el caso de un multirrotor de gran tamaño, que por su naturaleza es un sistema capaz de mantenerse estático en el espacio, tiene varios rotores que añaden estabilidad al conjunto con su efecto giroscópico y están libres de la mayoría de vibraciones que aparecen en un helicóptero, aunque éstos últimos también se usan ampliamente en filmación aérea y topografía. De este modo, una *gimbal* de este tipo puede llegar a hacer un trabajo aceptable montada en multicopteros y helicópteros de gran tamaño, volando estos de una manera dócil. Pero en cuanto la situación no es ideal, y el UAV no es capaz de realizar un vuelo extremadamente suave, o existe algún tipo de vibración complicada de eliminar, o las condiciones meteorológicas son tan bruscas que afectan incluso a este tipo de UAV, este tipo de *gimbal* enseguida deja ver sus limitaciones.

Poco tiempo después de aparecer estas *gimbals*, una vez que quedó demostrado su eficacia en aplicaciones de fotografía aérea y topografía, y por lo tanto su demanda en el mercado, apareció la siguiente generación de *gimbals* para estabilización de cámaras, que marcará un antes y un después en este sector.

Esta nueva generación de *gimbals* elimina los dos problemas descritos de la transmisión mediante servos usando motores *brushless*, motores sin escobillas de corriente trifásica con una transmisión directa para cada eje a estabilizar, sin reductoras y por tanto sin holguras. De este modo, se sustituyen los servos por motores a transmisión directa en las articulaciones de cada eje estabilizado. Estos motores necesitan del hardware apropiado para gobernar su funcionamiento, por una parte una electrónica de potencia para alimentarlos y por otra parte una electrónica de control.

Otra de las novedades de estos sistemas con respecto a los de primera generación, es que se pasa a colocar la IMU en la parte de la *gimbal* que queremos estabilizar, en el último eje de la jerarquía de la *gimbal*, de tal modo que se mueva solidaria con la cámara a estabilizar.

De este modo, no se “predice” la cantidad de movimiento angular que se debe aplicar a cada eje para mantener estable la cámara, cuando la IMU se colocaba solidaria con el chasis del UAV, si no que la IMU mide el error angular real en cada eje de la cámara ante una perturbación, el microprocesador procesa esta información, y comanda la cantidad de movimiento angular que ha de aplicar a cada motor para corregir este error. Este proceso se lleva a cabo a una frecuencia muy alta, del orden de 2 Khz o superior, por lo tanto el error real que tiene que corregir en cada ciclo es mínimo, lo cual unido a la rapidez de reacción y la ausencia de holgura de estos motores, hace que este tipo de *gimbal* pueda mantener una precisión de hasta 3 grados como máximo en la situación más desfavorable, aunque en las situaciones normales este error se suele mantener por debajo de 1 grado.

Mantener un error tan pequeño en la estabilización de una cámara marca un antes y un después en los sistemas de estabilización de imagen mecánicos. Desde que esta tecnología ha aparecido y se ha ido dando a conocer, es la única que se ha usado para este fin.



*Figura 3. gimbal brushless “de mano” para grabación profesional. Modelo Ronin de DJI*

Aunque esta tecnología ha supuesto un cambio radical en la estabilización de imagen mecánica, no está exenta de limitaciones. Se nombrarán las más importantes, ya que estas, junto a sus soluciones, se tratarán en las secciones de prototipos y modelo final.

De este modo, las principales limitaciones de estos sistemas son:

- Necesidad de equilibrio prácticamente perfecto en todos los ejes móviles: Los motores de estas *gimbal* son capaces de mantener la actitud de las cámaras quieta en el espacio, y moverlas a una velocidad modesta en el caso de requerirse apuntar con la *gimbal*, pero no pueden mover sus correspondientes ejes con soltura, y no pueden soportar mucho más trabajo que éste. Es decir, estos motores no son capaces de mover con soltura la masa de la cámara, si no que están pensados para únicamente mantener la actitud de esa masa inmóvil. De este modo, si la *gimbal* no está perfectamente equilibrada, los motores tendrán que lidiar además de con el trabajo de estabilizar su eje, con el trabajo de soportar el desequilibrio. Como se tratará más adelante, esto no solo es un problema en cuanto a la potencia del motor, que en muchos casos es capaz de soportar un pequeño desbalance, si no que una *gimbal* desequilibrada hace que su comportamiento sea mucho menos aproximable a lineal que una *gimbal* perfectamente equilibrada, y esto complica mucho las tareas de control que el microprocesador tiene que llevar a cabo, y se traduce en una estabilización pobre, con puntos inestables en algunas zonas de trabajo de la *gimbal*.

- Es necesario pasar muchos cables a través de cada eje: El mínimo número de cables que pasan a través de cada eje serán los 4 cables necesarios para alimentar y comunicarse con la IMU, que va solidaria con la cámara, y al pasar a través de cada eje, se añadirán 3 cables más de la alimentación de cada motor. Enrutar de 7 a 10 cables a través de cada eje de movimiento es delicado. Añaden resistencia mecánica con la que los motores tienen que lidiar, produciendo efectos similares al desequilibrio en la *gimbal*, y también provocan que exista un límite en la libertad de movimiento que pueden llevar a cabo los ejes. Además, la fatiga a la que están sometidos con el continuo movimiento hace que en muchas ocasiones fallen, por lo que se deben revisar con regularidad.

Si bien esta limitación es fácilmente subsanable en *gimbals* de gran tamaño, donde no importa la geometría ni la aerodinámica, como en el caso de las *gimbals* de mano o las que se usan como carga de pago en multirrotores que graban a velocidad reducida, el enrutado de los cables se convierte en un reto en las *gimbal* de tamaño reducido. Existen opciones como dejar mucha cantidad de cable

sobran en cada eje para que se vaya “enrollando” conforme se mueve el eje, o motores con ejes huecos para pasar a través de estos los cables. La solución de los ejes huecos es de las más favorables, aunque en *gimbals* de pequeño tamaño como las que se colocan en estos UAV de ala fija de tamaño reducido no es siempre viable, debido a que los motores son demasiado pequeños como para pasar todos los cables necesarios a través de su eje hueco.

-La estabilización no es absoluta en el espacio, existen zonas “restringidas”: Como se explicará más adelante en la sección *fundamentos mecánicos*, una *gimbal* tiene limitaciones en cuanto a zona útil de estabilización. Hay que tener en cuenta cuál es esta zona útil, e intentar que todas las posibles perturbaciones del UAV se encuentren dentro de esta zona.

Volviendo de nuevo al mercado de los UAS de alto rendimiento como Mantis, esta tecnología ha tardado mucho más en llegar. Muchas veces las nuevas tecnologías no se pueden aplicar en productos de requerimientos tan estrictos hasta que no se verifica y se certifica su funcionamiento en todas las situaciones a las que están sometidos estos UAS.

Cuando se comenzó el desarrollo del primer prototipo de esta carga de pago para el Mantis, a mediados de 2015 aún no existía ningún sistema de la competencia que usara este tipo de tecnología. Un año después empiezan a aparecer algunas soluciones de cargas de pago usando esta tecnología de motores brushless en la estabilización, Aunque todavía no han alcanzado el máximo potencial que se puede obtener de esta tecnología, puesto que, entre otros motivos, en estos UAV no basta sólo con tener una buena estabilización, si no que la carga de pago ha de comunicarse de forma eficiente con el autopiloto para apuntar a los objetivos de interés, y esto en un avión es más complicado que en un multirroto o un helicóptero, ya que nunca está estacionario en el espacio. Esto junto con las limitaciones de espacio, peso y aerodinámicas, hace que el diseño de una carga de pago competente de un tamaño y peso tan reducido sea algo más complejo de lo que parece a simple vista.

En muchas ocasiones, las limitaciones de espacio y peso llevan a los fabricantes a diseñar *gimbals* de dos ejes en lugar de tres. De hecho el primer prototipo de carga de pago para Mantis se hizo en dos ejes. Al sacrificar la estabilización mecánica de un eje, se pierde enormemente en calidad de estabilización. En sistemas de dos ejes las zonas útiles de trabajo son menores que en sistemas de tres ejes y en muchas ocasiones son insuficientes para estabilizar la imagen durante cualquier situación durante el vuelo. Existe una “pseudosolución” a la falta del tercer eje, y es delegar la estabilización en este eje a

un sistema digital de procesamiento de imagen, es decir, una estabilización digital. Esto puede corregir pequeños fallos en el error absoluto remanente en el sistema mecánico, así como rotar la imagen para una mejor observación por parte del operador, pero sigue sin tener la amplitud de zona útil de estabilización, y la rapidez de reacción y por tanto, calidad de estabilización que posee un sistema de tres ejes mecánicos.



## *4.2- PRESENTACIÓN DEL UAV MANTIS DE INDRA SYSTEMS*

Mantis es un UAV de ala fija, de categoría ligero, con una envergadura de dos metros, propulsión eléctrica y un peso al despegue en torno a los 5 kg. Es un sistema usado para misiones de reconocimiento, siendo su carga de pago un sistema de captación de imágenes con cámara visible o infrarroja. De este modo, el sistema recopila video y datos de la zona filmada por el UAV y los envía a la estación de tierra o GCS, para que los operadores puedan recopilar información de la zona de interés a tiempo real.

Este UAV tiene una autonomía de 2 horas, es de las más altas de su categoría y esto se consigue gracias a un diseño aerodinámico exquisito y a un peso muy contenido. Por este motivo para cualquier componente que se añada o cambie en este avión se tiene que tener muy en cuenta el peso e impacto aerodinámico.

Otro factor importante a tener en cuenta en el desarrollo de una nueva carga de pago para este UAV es la resistencia mecánica de la misma. El Mantis despegue y aterriza sobre su panza. Durante el despegue, se le engancha una goma a modo de lanzador que lo catapulte hasta su velocidad de sustentación. Hasta que alcanza dicha velocidad, la panza del avión arrastra por el suelo y aunque la carga de pago está ligeramente levantada con respecto a la panza y tiene unos pequeños topes a modo de fusible para que no roce directamente con el suelo, la realidad es que en muchos de los escenarios en los que se va a operar no se va a disponer de un suelo ideal, por lo que los impactos con las irregularidades del suelo son inevitables. Lo mismo ocurre durante el aterrizaje, a veces más duro incluso dependiendo de la velocidad a la que este aterrice.

Aunque sea tentador el uso de fibra de carbono para rigidizar sin aumentar el peso considerablemente hay que tener en cuenta que este material no es transparente a la radiofrecuencia, es prácticamente igual de opaco que los metales para las mismas, por lo tanto se tiene que dosificar mucho su uso en una aplicación como esta, donde se exprime al máximo el rendimiento de los equipos de radiofrecuencia y un exceso de fibra de carbono en la célula aérea podría limitarlo. Por este motivo, se intentará limitar el uso de este material a lo estrictamente imprescindible.

La carga de pago tendrá que alojar la cámara y todo el sistema de estabilización relacionado con ésta y el hardware necesario para gobernar esta estabilización y comunicarse con el autopiloto del UAV, además de ser ligera, resistente y aerodinámica.



*Figura 4. Vista del UAV Mantis desde el plano de cola*

No es de extrañar que el sector de los UAV ligeros se haya nutrido enormemente de todo el conocimiento desarrollado durante muchos años por el aeromodelismo. Este hobby lleva presente varias décadas y cada vez ha ido ganando más adeptos conforme la tecnología se ha ido abaratando. Sin embargo, la aparición de UAV de este tamaño es relativamente nueva, puesto que la tecnología necesaria para hacerlos competentes prácticamente no existía hasta hace apenas una década. Los avances que han hecho posible la creación de UAV tan ligeros competentes son principalmente las baterías de litio y las motorizaciones de motores trifásicos sin escobillas, con una alta eficiencia. Antes de la aparición de estos componentes clave se usaba para estos aeromodelos baterías de níquel cadmio o níquel metal hidruro y motores de escobillas. Estos conjuntos eran increíblemente pesados y poco eficientes en comparación con la tecnología de la que disponemos hoy en día y habría sido realmente imposible conseguir un UAV tan pequeño, con esta autonomía de no haber sido gracias a estos avances.



*Figura 5. Vista del UAV Mantis desde el extremo de un ala*

### 4.3- CARGA DE PAGO PREVIA A ESTE PROYECTO

Antes de contemplar la actualización de la carga de pago de este UAV, la carga de pago existente consistía en una *gimbal* de dos ejes, uno longitudinal y otro transversal, movidas por servos a través de una serie de engranajes reductores. Éstos servos estaban gobernados por el propio autopiloto. Cuando el autopiloto detectaba un cambio en la actitud del UAV, éste comandaba los movimientos angulares pertinentes en el servo de cada eje para mantener estabilizada la cámara.

La carcasa de la carga de pago está construida en fibra de vidrio, y las partes móviles de la *gimbal* así como la sección mediante la cual se une al fuselaje del avión están impresas en 3D, en plástico de alta calidad mediante la técnica de impresión laser. La parte móvil de la *gimbal* está cubierta por una esfera de fibra de carbono con una abertura transparente a través de la cual graba la cámara. Esta cubierta es necesaria puesto que al aterrizar recibe una gran parte del impacto de aterrizaje, y debe ser robusta para no deteriorarse.



*Figura 6. Vista frontal del UAV Mantis, donde se puede observar la carga de pago antigua*

Esta carga de pago presentaba los inconvenientes citados anteriormente derivados del uso de servos en estabilización de imagen. Además, debido al hecho de que la carga de pago en este UAV recibe un trato especialmente duro por la forma de aterrizar del mismo, estos inconvenientes se acentuaban con el tiempo, al deteriorarse poco a poco la mecánica y acumularse las holguras cada vez más. También, al depender la calibración de la misma de los encoder presentes en los servos, era ardua de llevar a cabo. Se debía colocar en un banco de calibración, y centrar cada eje en su punto exacto para que tuviese la misma referencia que el autopiloto. Si esta calibración no se llevaba a cabo concienzudamente, el autopiloto y la carga de pago no tendrían las mismas referencias y la estabilización se veía gravemente afectada.

A continuación se presenta un esquema de los componentes más significativos de la carga de pago previa.

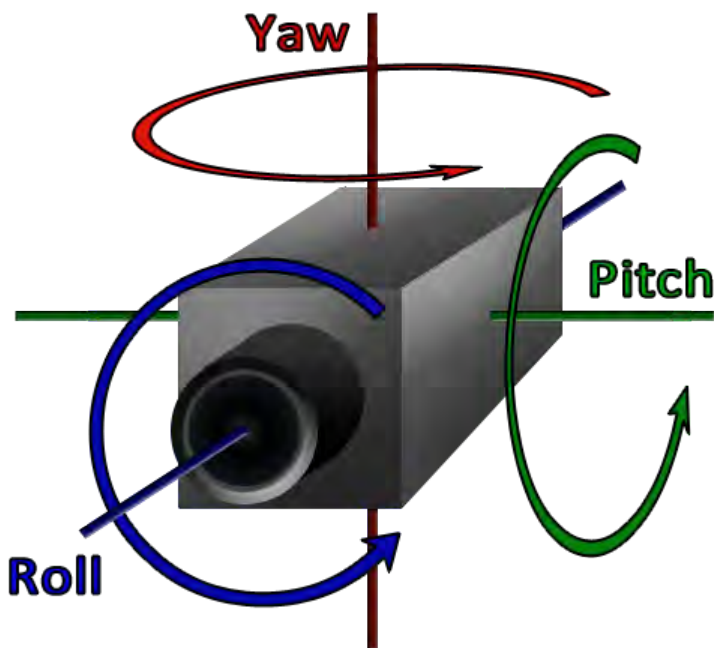
Carcasa exterior	-Sobre ella están montados los demás componentes. Además de dar soporte al resto de piezas del conjunto tiene una forma aerodinámica que sigue la línea del fuselaje del UAV. Tiene una función tanto estructural como aerodinámica.
Mecánica de la <i>gimbal</i>	-En esta versión son dos ejes transversales, en torno a los cuales gira la cámara. Es soportada por la carcasa exterior a través de soportes rotatorios.
Electrónica de control	-En esta versión la electrónica únicamente consiste en la interfaz para comunicarse con el autopiloto, ya que es el que se encarga de la estabilización.
Actuadores	-En esta versión son dos servos, uno para cada eje móvil. Los ejes son movidos por estos servos a través de un conjunto de engranajes reductores.
Cámara de video	-Es el último componente en la jerarquía de ejes de la <i>gimbal</i> . En este UAV existe la opción de montar la carga de pago con una cámara visible de alta resolución o con una cámara infrarroja.
Software de control	-En esta versión el software de control de la carga de pago está en el propio autopiloto, no tiene un software independiente.

## 5- FUNDAMENTOS TEÓRICOS

En este apartado se desarrollarán los fundamentos teóricos básicos aplicados en el desarrollo de éste proyecto. Se comenzará introduciendo los fundamentos geométricos de los giroscopos, y la peculiaridad de los angulos de Euler en este tipo de aplicación, posteriormente se estudiará la parte eléctrica para mover el dispositivo y variar los ángulos de Euler, le seguirá la parte electrónica para controlar la parte eléctrica, y por último se introducirán los fundamentos de control que gobiernan todo el conjunto.

### 5.1- Fundamentos geométricos: Ángulos de Euler en *gimbals*

A partir de este momento, se va a hablar con la nomenclatura de ángulos de Euler. Se supondra un sistema de tres ejes, y dichos ejes tomarán las nomenclaturas que toman en aeronáutica, que corresponderán con su respectivo ángulo de Euler, *yaw*, *roll* y *pitch*.



De este modo, dándole a este sistema una referencia inicial, podemos definir cualquiera que sea su actitud en el espacio con el valor de sus ángulos de Euler.

En un principio también se barajó la referencia en la actitud por cuaternios, pero se decidió usar ángulos de Euler. El motivo principal es que la forma y las características físicas de una *gimbal* como la que requiere el proyecto es exactamente la misma que en esta representación. Es decir,

Figura 7. Ángulos de Euler y sus correspondientes ejes

se tendrá que controlar el valor de cada ángulo de Euler para mantener la cámara estabilizada, y esto es precisamente la posición angular de cada uno de los tres motores que posee este sistema, para cada uno de los tres ejes a estabilizar.



Hay que tener en cuenta que estos tres ejes son siempre ortogonales en el caso de una aeronave por ejemplo, puesto que la base formada por los mismos se mueve solidaria con ella, pero en el caso de la *gimbal* estos ejes no siempre son ortogonales, y este va a ser uno de los principales obstáculos a superar en el control de la misma.

Existe un fenómeno llamado *gimbal lock* que se da en estos sistemas, cuando en ciertas combinaciones de movimientos, dos de los ejes de rotación resultan coincidentes, con la consiguiente pérdida de un grado de libertad.

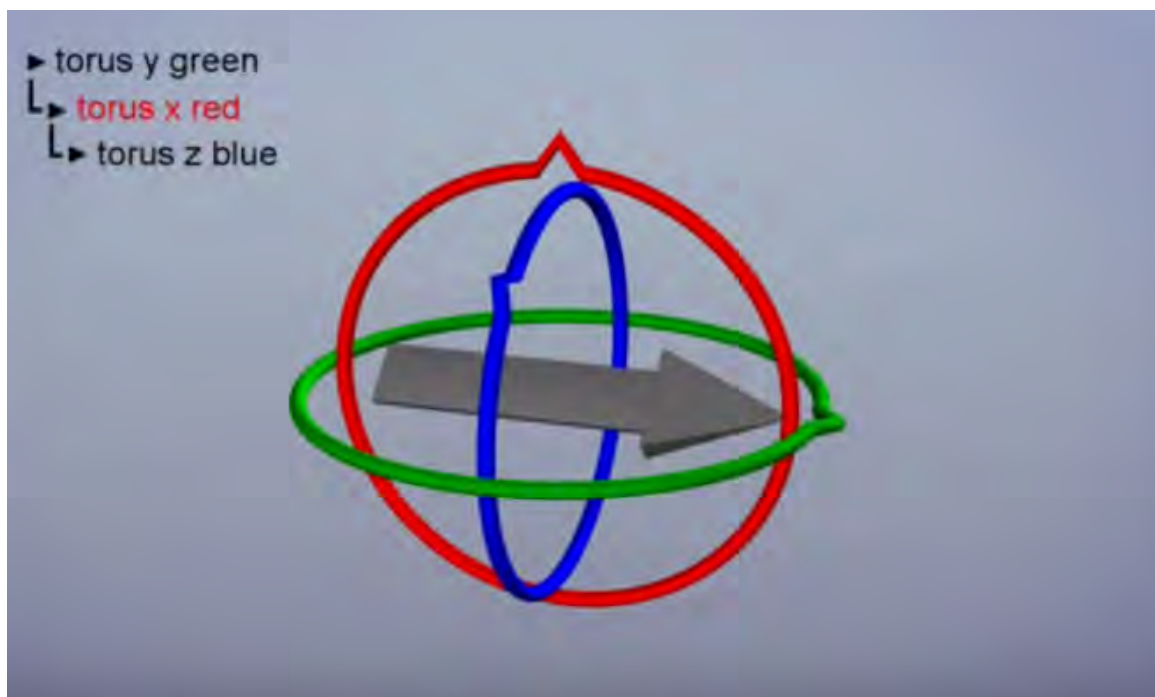


Figura 8

Considerando el sistema de la figura 8 donde la jerarquía de los tres ejes es *yaw*, *pitch* y *roll*, una rotación del eje *yaw* (verde) contendrá la rotación sobre ese eje de los ejes *roll* y *pitch*.

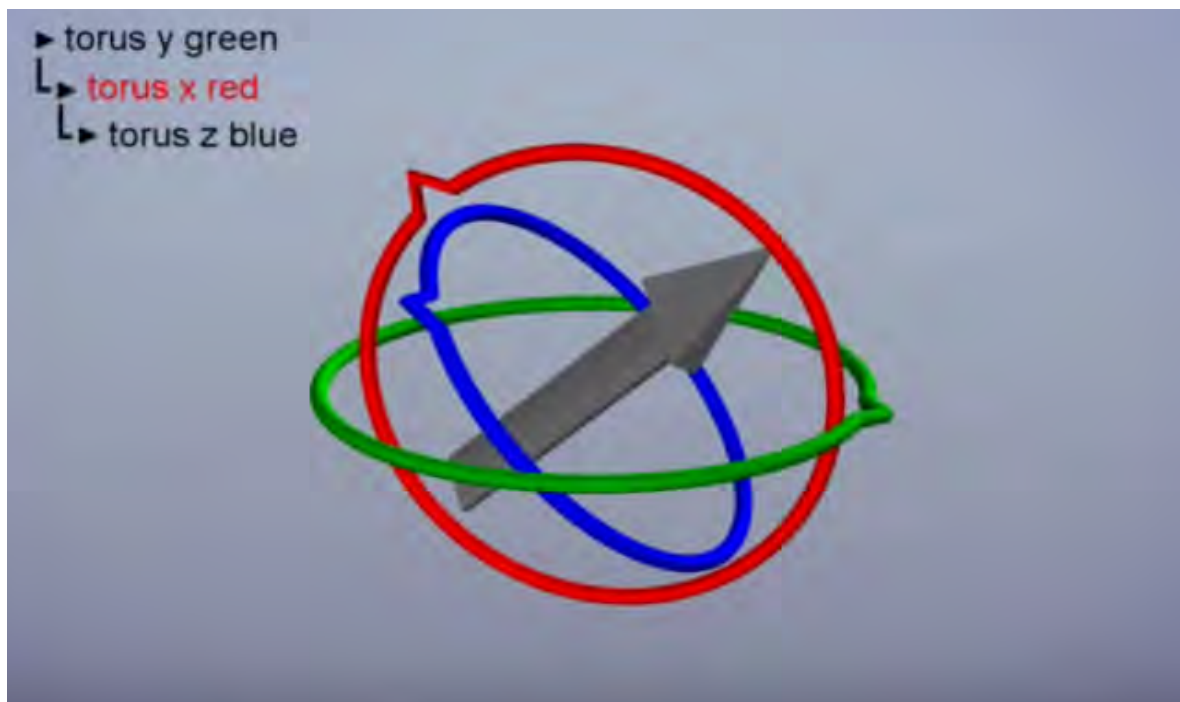


Figura 9

Del mismo modo, una rotación sobre el eje de *pitch* (rojo) contendrá la misma rotación para la orientación del eje *roll* (azul), pero el eje *yaw* se mantendrá con la misma orientación, puesto que es el primero en la jerarquía. En la figura 9 se puede observar como cambiaría el sistema al rotar aproximadamente 30 grados de *pitch*.

Imaginado que en lugar de girar únicamente unos 30 grados el eje *pitch*, se rotase más, hasta los 90 grados por completo, se tendría la situación de la figura 10.



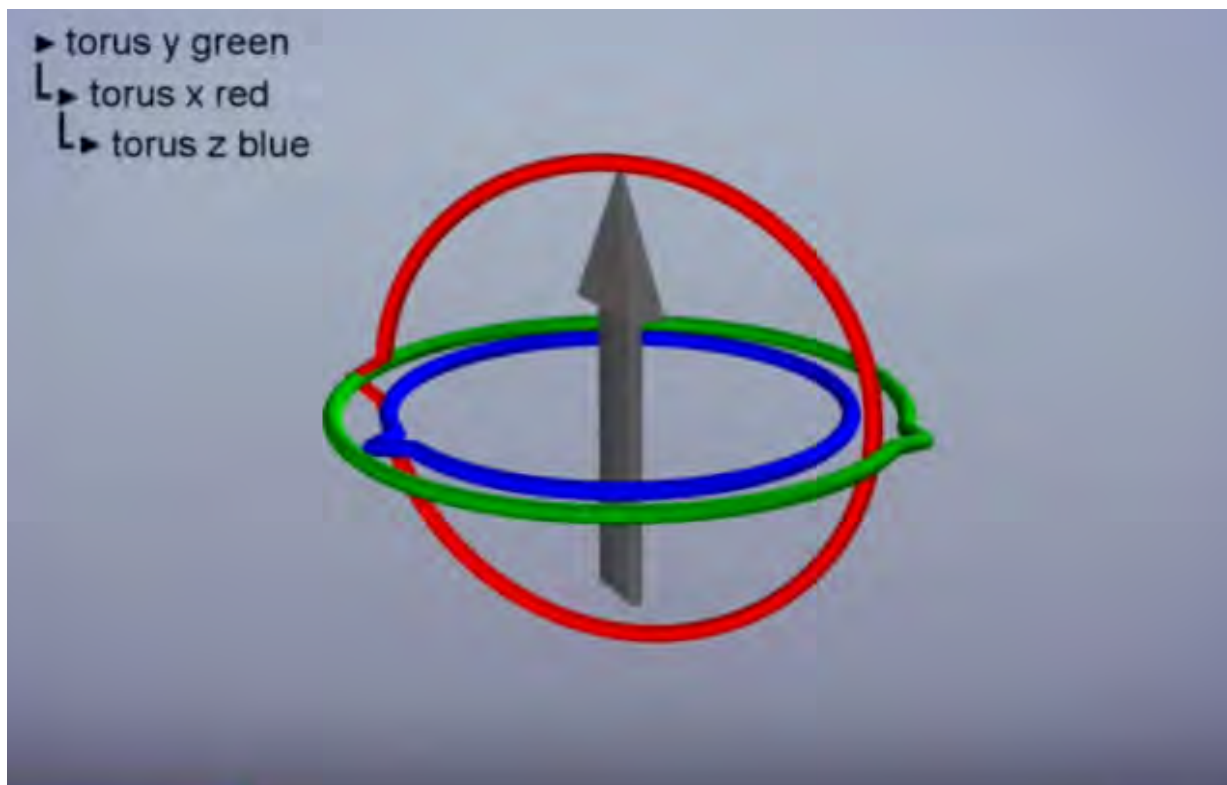


Figura 10

En esta situación el eje de *roll* (azul) y el eje de *yaw* (verde) son coincidentes. Al ser coincidentes se ha perdido un grado de libertad en la *gimbal*. En la situación de la figura, únicamente podemos mover la flecha en el eje *yaw* y *pitch*, ya que *roll* es coincidente con *yaw*. Cuando esto ocurre decimos que se ha producido el fenómeno *gimbal lock*.

Las consecuencias de este fenómeno para esta aplicación son fatales, ya que perder un grado de libertad supone dejar un eje completamente a merced de las perturbaciones externas del UAV, las cuales siempre van a estar presentes.

Este fenómeno sólo se da cuando se ejecutan rotaciones en el eje que está en medio de la jerarquía, recordando que en el ejemplo anterior el orden era *yaw-pitch-roll*. Si se intenta limitar en la medida de lo posible las rotaciones en el eje que está en mitad de la jerarquía, es decir, intentar jugar únicamente con las rotaciones del primer y tercer eje para mover la *gimbal*, será mucho más complicado que se de la situación de *gimbal lock*.

Se puede configurar la jerarquía de ejes en una *gimbal* de tal modo que moviendo únicamente el primer y último eje de la jerarquía podamos apuntar a la esfera completa definida por todas las posibles orientaciones en el espacio, con la peculiaridad de que se

tenrá que dejar el eje de en medio de la jerarquía inmovil, para preservar la ortogonalidad entre el primer y último eje. De este modo, se conseguirá evitar el *gimbal lock*, y se podrá apuntar a cualquier punto.

Supongase el nuevo orden en la jerarquía de ángulos de Euler de la figura 11.

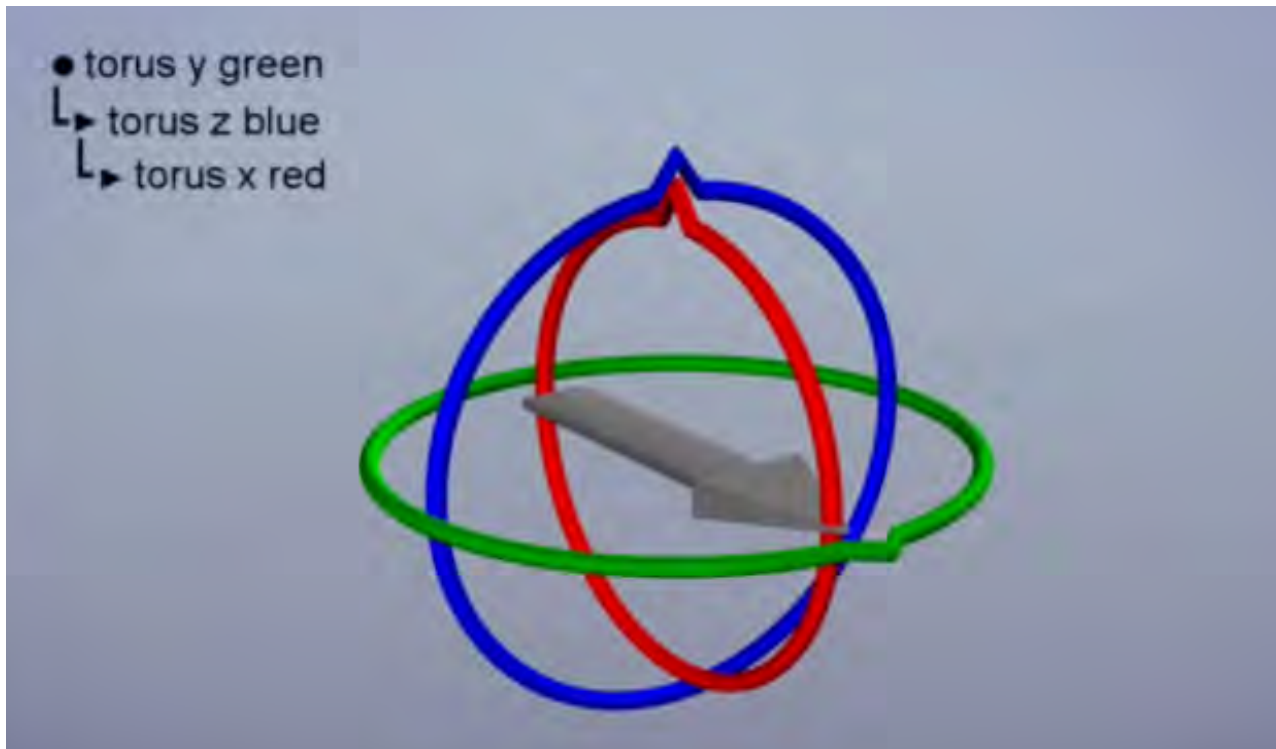


Figura 11

Donde el primer eje en la jerarquía es *yaw* (verde), el segundo es *roll* (azul), y el último es *pitch* (rojo). Con esta configuración de ejes, se puede orientar la flecha de tal modo que apunte a cualquier punto de la esfera que la contiene, moviendo únicamente el primer y último eje de la jerarquía, *yaw* y *pitch*.

De este modo, se evita que se produzca *gimbal lock*, y únicamente se pierde la capacidad de mover el eje de *roll*, lo cual no es de interés en este sistema. La *gimbal* de este proyecto va a estabilizar una imagen, que deberá ser procesada por operadores, y la mente humana está estructurada para reconocer mucho mejor imágenes alineadas con el horizonte, es decir, con el ángulo de *roll* a 0 grados, por lo tanto usar únicamente *yaw* y *pitch* para apuntar no solo beneficia el sistema en cuanto a la ausencia de *gimbal lock* si

no que también asegura que la imagen va a estar alineada con el horizonte, y los operadores no tendrán que girar la cabeza para entender la imagen con claridad, como ocurre en los sistemas de *gimbal* de dos ejes que se explicarán en el apartado del primer prototipo.

No obstante aunque se utilice esta jerarquía de ejes la *gimbal* no estará exenta de complicaciones. Usando esta configuración se previene que no ocurra *gimbal lock* siempre y cuando la referencia global se encuentre en reposo, como en las ilustraciones anteriores. En esta aplicación, la referencia global es el UAV, y está en continuo movimiento. Por este motivo, no sólo se tiene que pensar en este sistema para apuntar a diferentes puntos del espacio, si no que también se debe pensar que tiene que hacer esto mientras estabiliza perturbaciones en los tres ejes de rotación de Euler.

Como se ha observado, cuando se elija el orden de ejes mencionado, su sistema de referencia global esté en reposo, y se use únicamente *yaw* y *pitch* para apuntar, se asegurará que éstos siempre van a ser ortogonales. Esto no ocurre cuando se traslada el sistema al UAV. Ante perturbaciones externas muy acusadas, podría producirse *gimbal lock*. Imaginando una perturbación en el eje *roll* del UAV de 90 grados, horarios o antihorarios, el *gimbal lock* ocurrirá de cualquier modo, ya que el motor que estabiliza *yaw*, y el motor que estabiliza *pitch* en dicha *gimbal*, serán coincidentes.

Por suerte, este UAV al estar destinado únicamente al reconocimiento no requiere de capacidad de vuelo tan agresivo como para que se diesen dichos casos extremos. El autopiloto está programado para que durante el vuelo tenga los movimientos de *pitch* y *roll* limitados. No obstante, aunque estos limitados movimientos en *pitch* y *roll* no sean suficientes para provocar *gimbal lock* en esta carga de pago, si son suficientes para afectar a la linealidad en el sistema, como se verá más adelante.

## 5.2- Fundamentos eléctricos: motores BLDC

Una vez presentadas las características geométricas del tipo de *gimbal* que se va a usar en este proyecto, se introducirá brevemente el funcionamiento tradicional de los motores *brushless* BLDC que se van a usar para el control de cada uno de los ángulos de Euler, aunque la forma en que se van a gobernar en esta aplicación será ligeramente diferente a la tradicional, como se verá en los siguientes apartados teóricos.

Este tipo de motores están formados por una parte fija o estator, y una parte móvil o rotor. En el estator se encuentran las bobinas, las cuales se agrupan en fases. Estas bobinas son simplemente hilo de cobre enrollado alrededor de un material ferromagnético, para conformar un electroimán. La parte móvil o rotor es la que transmitirá el movimiento, y en ella se encuentran colocados imanes permanentes.

Estos motores funcionan con corriente alterna trifásica. De este modo, el motor estará conectado con el sistema que le proporciona corriente eléctrica por tres cables, correspondiendo cada uno de éstos a una de sus fases, como los tres colores diferentes de la figura 12.

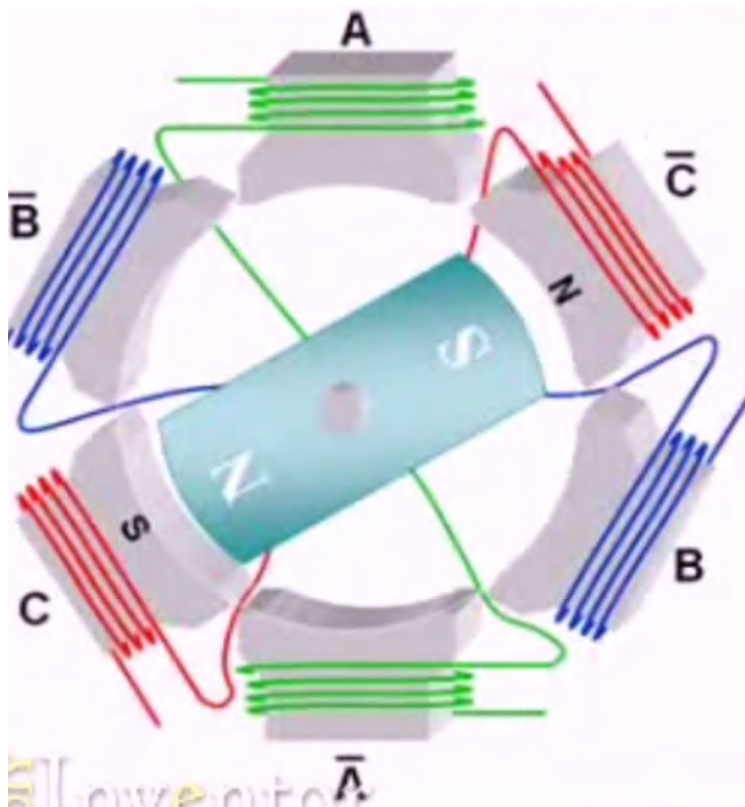


Figura 12. Esquema de fases en un motor BLDC

En un primer momento se va a considerar que cada fase tiene únicamente dos bobinas, las cuales se encuentran completamente opuestas en torno al centro del motor, tal y como se indica en la ilustración. También se va a considerar que el rotor tiene únicamente dos polos. Se le llama polo a cada imán permanente presente en el rotor del motor. En el caso de la ilustración, se tendría un imán permanente con su polaridad sur apuntando hacia fuera del rotor, es decir, hacia las bobinas, y en su extremo opuesto se encontraría otro polo orientado del mismo modo pero con su polaridad opuesta apuntando hacia las bobinas.

De este modo, según sea el signo de la corriente que se manda por una fase, provocará una polaridad diferente en ésta, generando una fuerza magnética que atraiga o repela al correspondiente polo del rotor en cada momento, según sea necesario para provocar la rotación del rotor, como se vera a continuación.

En el esquema de motor de la figura 12, cada par de bobinas en cada fase estan bobinadas en sentido contrario. El sentido hacia el cual esté enrollado el cobre en cada bobina, determina el signo de la fuerza magnética que va a generar cuando circule corriente a través de ella. De este modo, la bobina A y la A' están bobinadas de tal modo que cuando la bobina A genera fuerza magnética de atracción positiva, su opuesta A' genera fuerza de atracción negativa, o fuerza repulsiva. De este modo, en la situación de la ilustración, si se le aplica a la fase verde corriente positiva, y a la fase azul corriente negativa ocurriría lo siguiente.

La bobina A generaría una fuerza magnética “Norte” que atraería al polo sur del rotor. A su vez, la bobina A' al estar bobinada al revés, generará una fuerza magnética “sur” que atraerá al polo norte del rotor. Además de esto, al aplicar corriente negativa a la fase azul, la bobina B generará fuerza magnética “sur” que repelerá el polo sur del rotor, y su correspondiente bobina B', al estar conectada con la B pero bobinada al revés, generará una fuerza magnética “norte” que repelerá el polo norte del rotor, dejando en este caso la fase roja, las bobinas C y C' sin aplicar ningún tipo de corriente.

Al proporcionar la mencionada corriente, y producirse sus correspondientes fuerzas magnéticas, se provocará un giro del rotor antihorario, hasta que los polos del rotor coincidan con las bobinas A y A', cuando se repetirá el proceso pero ahora con las bobinas B, B', C y C' hasta que el rotor se alinee con las bobinas B y B', y así sucesivamente.

Repitiendo este proceso alimentando en el momento adecuado a la fase necesaria se conseguirá una rotación continua del motor, y con un torque prácticamente constante una vez alcanzado cierto régimen de revoluciones. En la figura 13 se puede observar un esquema de las fuerzas de atracción y repulsión en el rotor de un motor BLDC en un instante dado durante su funcionamiento.

La mayor complicación de este proceso es saber cuando se tiene que conmutar la alimentación de cada fase, es decir, en que momento alimentar a cada fase, y con que magnitud hacerlo. La única forma de saber esto es de algún modo saber en que posición se encuentra el rotor, para saber en que posición relativa está con respecto a cada fase y así poder conmutar correctamente la corriente en cada una de ellas.

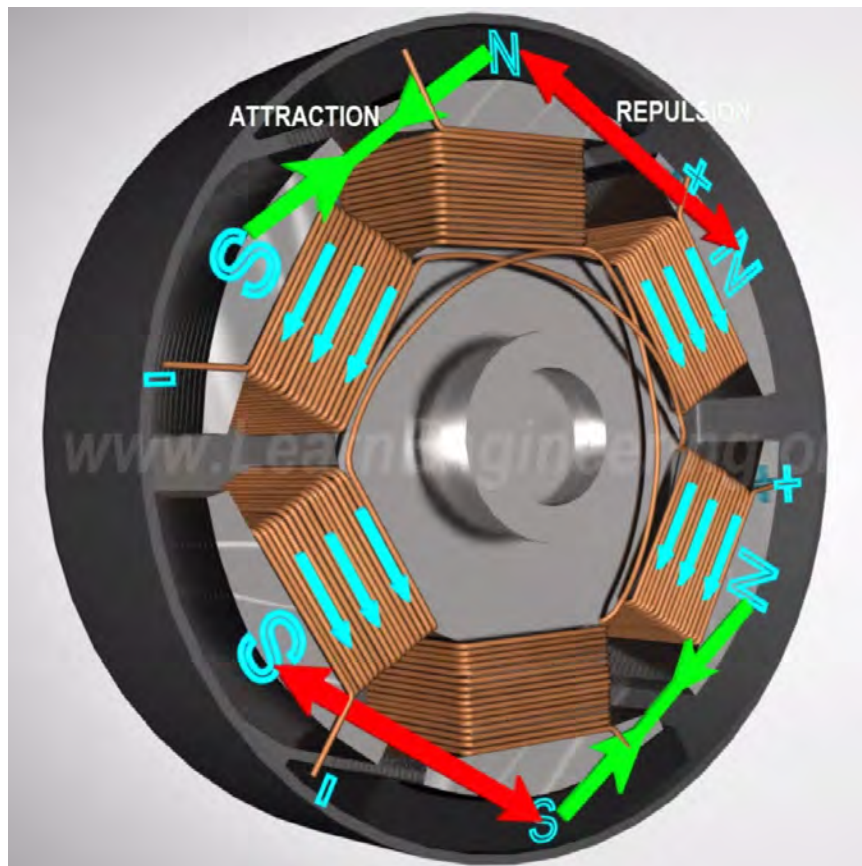


Figura 13. Esquema de las fuerzas de repulsión y atracción magnéticas en un motor BLDC en funcionamiento



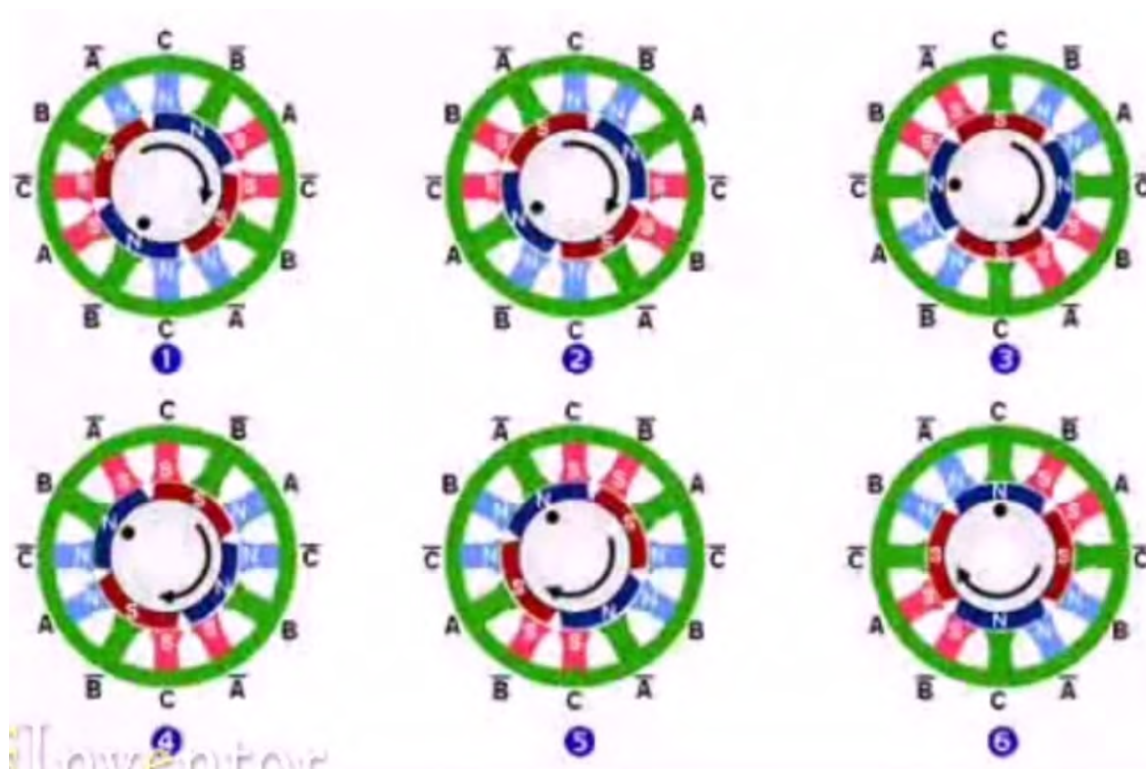


Figura 14. Esquema de como se conmutan las fases para una rotación continua en un motor BLDC

Hay varias formas de conseguir saber la posición relativa del rotor con respecto al estator. La más intuitiva sería colocar un encoder, un sensor de posición angular. Muchos motores BLDC usan esta técnica. Se coloca un encoder que mida la posición angular del rotor, y de este modo, sabiendo la configuración de las bobinas del estator, activar una u otra fase.

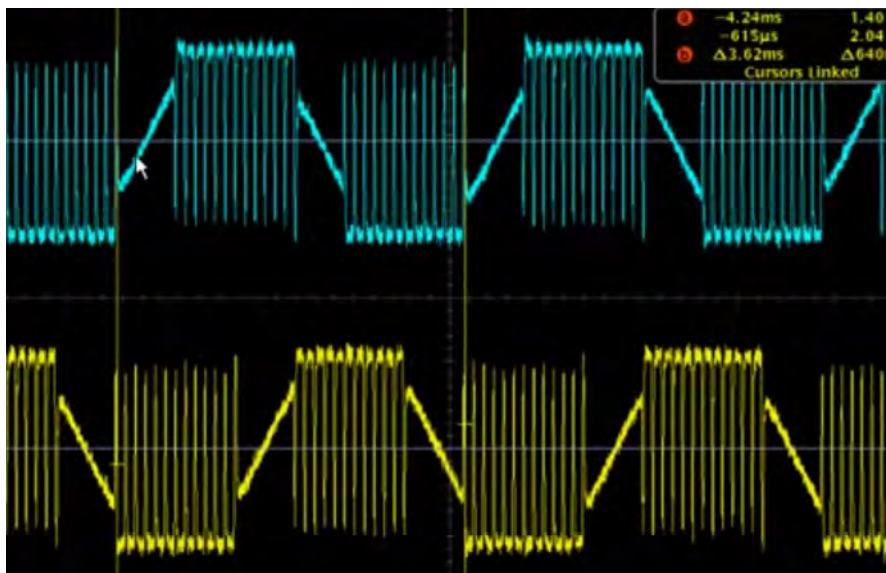
Esta técnica es efectiva, pero presenta algunos inconvenientes. Al delegar el buen funcionamiento del motor al sensor de posición del rotor, se corre el riesgo de que el motor quede inutilizado ante un fallo en dicho sensor. Además, el uso de un encoder conlleva hacer un motor más grande, más pesado, y con más cables que se tendrán que enrutar a través de la articulación de cada eje en la *gimbal*, y como se dijo anteriormente, la resistencia mecánica de estos cables entorpece el buen funcionamiento del sistema.

También existe la posibilidad de colocar sensores de efecto hall, colocados alrededor del motor, que al medir la variación del campo magnético en el mismo pueden deducir la posición del rotor, y así conmutar correctamente las fases, pero tiene prácticamente los mismos inconvenientes que los encoder.

La otra forma tradicional de saber en qué posición relativa está el rotor es midiendo la *back emf* o fuerza contraelectromotriz.

Al igual que cuando se varia progresivamente la corriente en una bobina, la fuerza magnética producida por ésta también aumenta progresivamente, cuando ocurre lo contrario, es decir, cuando se acerca un imán permanente a una bobina desenergizada, se induce una corriente en ella, y es precisamente a esto a lo que se le llama BEMF.

Recordando que el giro del rotor está provocado por transmitirle corriente a dos fases, de signo opuesto, quedando la tercera fase sin aporte de alimentación, en los motores BLDC controlados por BEMF es esta fase sin energizar en la que se medirá la BEMF para conocer la posición relativa del rotor.



*Figura 15. Medición de la BEMF en un osciloscopio*

En la figura 15 se muestra el aspecto que tiene la lectura de la *back emf* en dos de las tres fases de un motor BLDC. Cuando la línea está horizontal, quiere decir que se está alimentando la fase en cuestión, con corriente positiva en el caso de estar en la parte alta o corriente negativa en el caso contrario. Las líneas con pendiente corresponden a la BEMF. Midiendo esto en las tres fases del motor, es posible conocer la posición del rotor con la suficiente precisión como para conmutar de forma correcta la alimentación de sus fases.

Es interesante introducir en este punto el concepto de revolución eléctrica. En un motor BLDC, una revolución eléctrica corresponde a un ciclo completo de una fase en la que se



suministra corriente positiva, luego se desenergiza para percibir la BEMF, y posteriormente se vuelve a energizar con corriente negativa.

Las características técnicas proporcionadas por los fabricantes de estos motores que van a ser de interés para este proyecto son las siguientes:

-Kv: Son las revoluciones por minuto del motor, por cada voltio suministrado. Está relacionado con la configuración del estator, pero lo que realmente lo determina es la forma en que esté bobinado. Si el bobinado consiste en hilo fino, y muchas vueltas alrededor de cada bobina, tendrá muchas menos Kv que un bobinado grueso y con pocas vueltas. En esta aplicación, se buscará un motor con muy pocos kv, del orden de 40 hasta 200 como mucho. Hay que tener en cuenta que los motores BLDC diseñados para propulsión para el voltaje que se va a usar en esta aplicación ( 9-16 voltios ) suelen tener por encima de 700 kv, pudiendo llegar hasta 5000 kv incluso, por lo tanto el valor que se neceses es realmente muy bajo.

En los motores con un valor de Kv mucho más alto, a bajas revoluciones es más complicada aún la medición de la *back emf*. Esto es debido a que la magnitud de la BEMF dependa directamente del número de vueltas de cobre que posea cada bobina.

-Configuración del motor, es decir, número de polos y de bobinas. Se necesitan motores con mucho torque a muy baja velocidad, por lo tanto cuantos más polos y bobinas tenga, mejor será su comportamiento en estas condiciones, ya que tendrá mas revoluciones eléctricas, o “ciclos” de atracción-repulsión por cada revolución mecánica completa, por lo que tendrá un torque será más homogéneo.

Hay que recordar que en esta aplicación los motores van a trabajar a revoluciones muy bajas, en muchas ocasiones incluso totalmente quietos, con el rotor bloqueado por las fuerzas magnéticas de las bobinas. En esta situación, no en todos los puntos de la posición relativa del rotor con respecto al estator se consigue el mismo torque de bloqueo. Cuando un polo coincida exactamente encima de una bobina que le esté atrayendo, el rotor estará bloqueado con más fuerza que en otra posición en la que ningún polo esté en esa situación, si no que esté bloqueado por el equilibrio entre dos bobinas con fuerzas magnéticas opuestas.

También se tiene que tener en cuenta que las propias bobinas al ser metálicas, provocan una fuerza de atracción. En los motores con muy poca densidad de polos y bobinas, desenergizados, se puede apreciar con facilidad que al girarlos manualmente, éstos se bloquean en algunos puntos del giro precisamente por éste motivo. Esto es comúnmente llamado “cogging effect” .

Este efecto es perjudicial cuando se quiere que un motor gire a muchas revoluciones, por este motivo, los motores con muchos kv suelen tener pocas bobinas y polos. Aunque esto provoque un par no constante a bajas revoluciones, a altas revoluciones es imperceptible.

En los motores con pocos kv, al tener una densidad de polos y bobinas mucho mayor, se consigue que el espacio en el cual se produce el *cogging* sea mucho más pequeño que en los motores con menos bobinas. Al ser dicho espacio más pequeño, y existir muchos más puntos en los que se produce cuanto mayor sea el número de bobinas y polos, el torque de un punto a otro de la posición angular del rotor es también mucho más homogéneo.

Por lo tanto, el tipo de motor BLDC que usará para esta aplicación tendrá muy pocos kv, del orden de 80-200, y una configuración con el máximo número de bobinas y polos para su tamaño.

### 5.3.1- Fundamentos electrónicos: Control de motores BLDC

Del apartado anterior se deduce que se necesita alimentar los motores de forma separada para cada una de sus fases, y por otra parte, medir la BEMF para conocer la posición relativa del rotor con respecto al estator, y saber cuando conmutar la alimentación positiva y negativa para cada fase de forma correcta.

En el apartado anterior se ha explicado el funcionamiento del motor con un valor de corriente máxima positiva, máxima negativa, y neutra, siendo la neutra en la que medimos la *back emf*. En la figura 16 se puede observar como se comportaría el voltaje de cada fase (línea discontinua), la corriente aplicada en cada fase (línea de puntos), y el paso por cero, es decir, cuando se tiene que cambiar la conmutación para seguir rotando (línea continua).

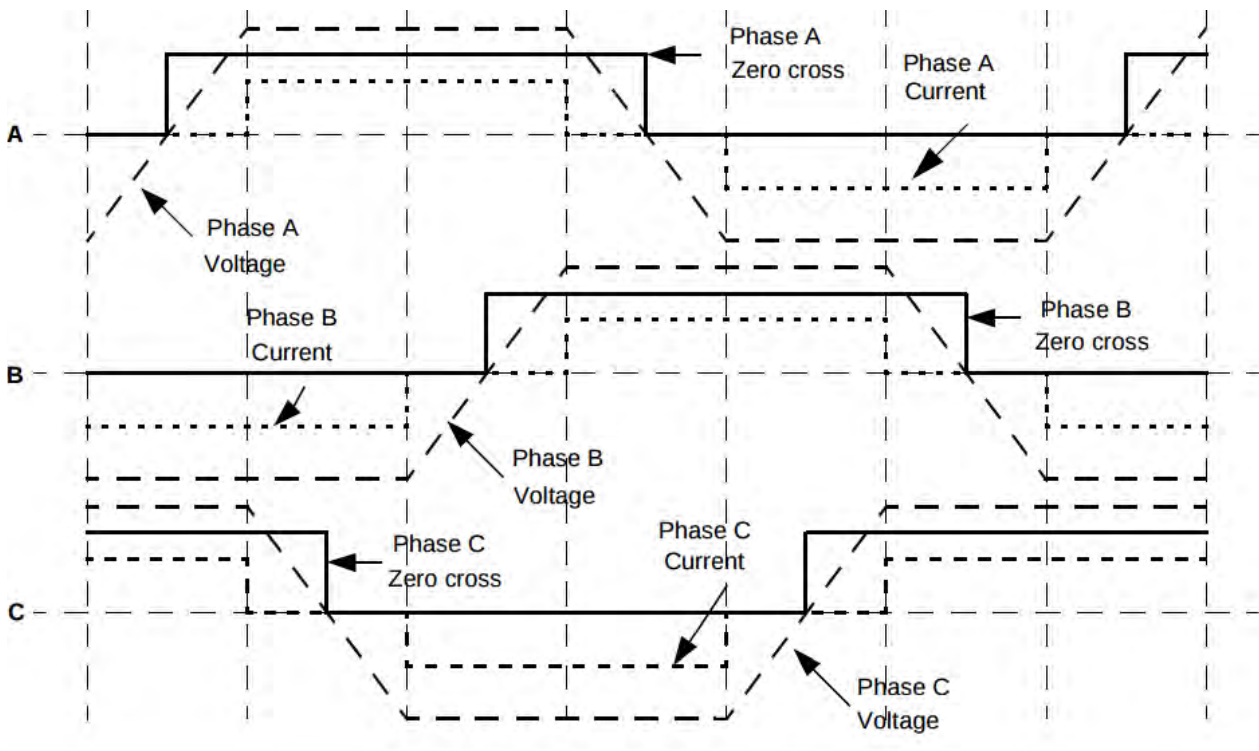


Figura 16. Gráfico de Como varía la corriente, voltaje, y el paso por cero de las fases de un motor BLDC.

Se puede observar como la corriente es constante cuando el voltaje también lo es, es decir, cuando las fases están conmutadas tanto con corriente positiva como negativa, pero cuando el voltaje varía, esta corriente decrece de forma constante hasta su valor máximo del signo opuesto. Aunque el voltaje varíe de forma brusca, debido a la inducción

de las bobinas, la corriente varia de forma suave, y cuando esta corriente pasa por el punto medio del valor máximo positivo y máximo negativo, se considera que es su paso por cero.

Como se aclaraba en el apartado de fundamentos eléctricos, el uso de la BEMF para conmutar el cambio en las fases tiene un inconveniente a baja velocidad de rotación. La BEMF es mayor cuanto mayor sea la velocidad a la que varía su campo magnético, es decir, cuanto mayor sea la velocidad de rotación del rotor.

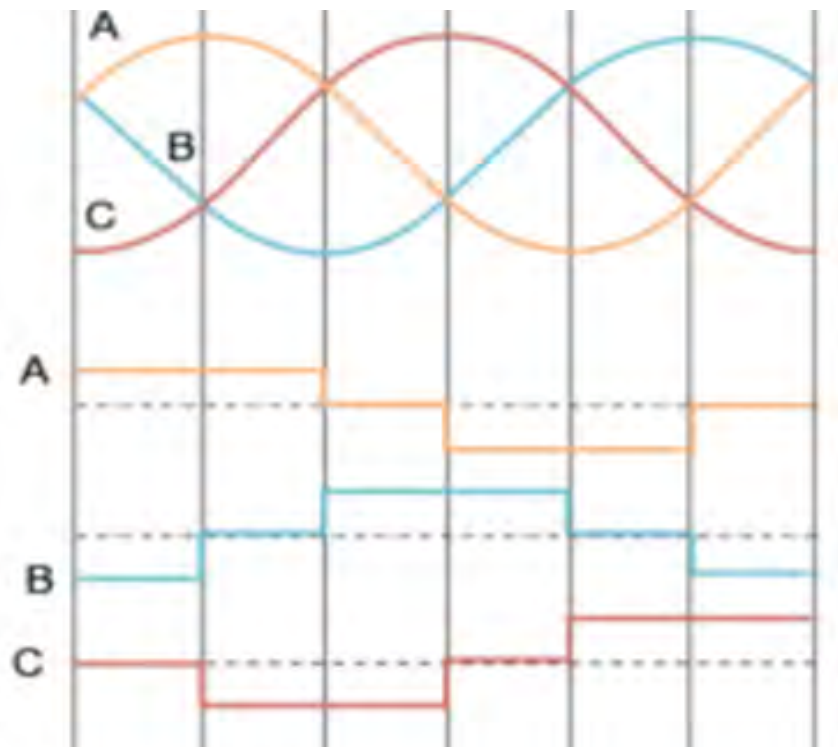
De este modo, cuando la velocidad del motor es muy baja, la BEMF inducida es tan leve que no se puede detectar apenas para hacer la conmutación. Por este motivo, los motores BLDC gobernados de este modo, al arrancar funcionan en bucle abierto, sin recibir realimentación de la BEMF, realizando la conmutación de las 3 fases desfasada 120 grados, pero a una frecuencia fija, al no conocer la posición del rotor. Al hacer esta conmutación “a ciegas” estos motores no pueden ser utilizados de forma útil a regímenes tan bajos de revoluciones, por que no tienen un torque constante al no conmutar de forma precisa sus fases. Así, cuando en bucle abierto se ha conseguido la suficiente velocidad angular como para provocar una BEMF legible por los sensores, el modo de funcionamiento pasa a bucle cerrado.

Esta peculiaridad a bajas revoluciones es desastrosa para su aplicación en una *gimbal*, en la que se va a trabajar con velocidades angulares ínfimas comparadas con las velocidades a las que trabajan estos motores habitualmente, en aplicaciones de potencia. A lo largo de este apartado y el siguiente se describirá como se ha solucionado este inconveniente.

Hasta ahora se ha hecho hincapié en este tipo de control en estos motores, en los que es necesario que haya momentos en los que una fase esté desenergizada para medir la BEMF. A este tipo de conmutación se le denomina conmutación trapezoidal, o en 6 fases. Dividiendo un ciclo completo de conmutación de una fase en 6 partes, dos de ellas está en voltaje máximo positivo, otra dos en máximo negativo, y otras dos desenergizada, como se observa en la figura 17.

En el caso de los motores BLDC con encoder, al no ser necesario leer la BEMF para conocer la posición del rotor, se pueden conmutar las fases de una forma más suave y continua, desfasadas también 120 grados entre ellas, pero con ondas senoidales, como se observa también en la figura 17. Estos motores tienen un comportamiento mejor a bajas revoluciones, mejor cuanto más resolución tengan sus encoder.

A pesar de esta ventaja, el inconveniente de los cables extras que supondría el uso de estos encoder y la resistencia al movimiento asociada a ellos lo hacen inviable para una *gimbal* de un tamaño tan reducido, no obstante, esta forma de control servirá de inspiración para la forma final en que se controlarán los motores BLDC en esta *gimbal*. Ya que, independientemente de la forma de conocer la posición del rotor, se necesita un funcionamiento a muy bajas revoluciones de forma suave y con un torque constante, se elegirá la conmutación senoidal para esta aplicación. Mas adelante se verá como conocer la posición del rotor.



*Figura 17. Comparación de la corriente en cada una de las fases A, B y C durante una revolución eléctrica en un motor BLDC según el método en 6 fases (inferior) o senoidal (superior).*

El circuito que se diseñará para controlar los motores generará señales senoidales, que posteriormente se amplificarán para tener suficiente potencia como para mover los motores. Hay varias formas de generar estas señales senoidales, pero se va a optar por la generación de ondas senoidales a partir del valor absoluto de ondas PWM, como se verá a continuación. PWM son las siglas de “pulse width modulation”, es decir modulación de ancho de pulso. Este tipo de señal consiste en un tren de pulsos con un valor bajo y un valor alto, en el que la duración de este último o lo que es lo mismo el “ancho” de la parte

alta del pulso conforma el valor de la señal. En la figura 18 se puede observar como varía el ancho de pulso para cada valor de señal, o "Duty Cycle".

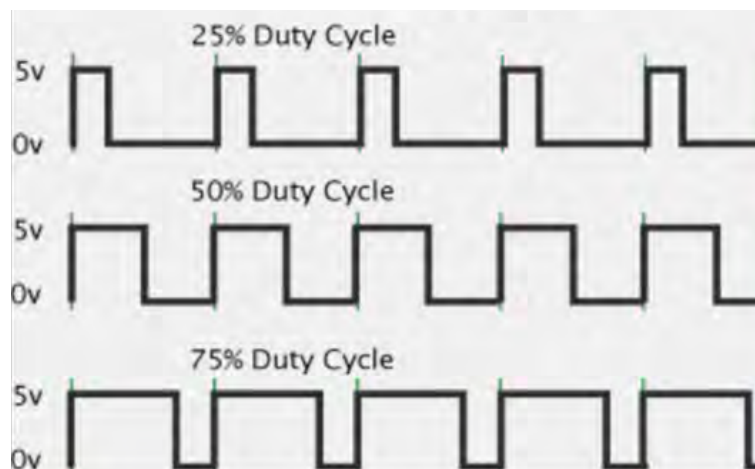


Figura 18. Variación del ancho de pulso o *duty cycle* de una señal PWM.

Pudiendo generar una señal PWM, es muy sencillo obtener una señal sinusoidal de ella, pero antes se introducirá el significado de valor eficaz de una señal.

El valor eficaz de una señal corresponde con el valor de corriente continua que habría que aplicar para transmitir la misma potencia que con dicha señal.

De este modo, para variar el valor eficaz de una señal PWM, bastará con variar el ancho de pulso, o el *Duty Cycle* de la misma, y para conseguir una señal sinusoidal a partir del valor eficaz de una señal PWM, se deberá variar el ancho de pulso progresivamente siguiendo el trazado de una señal senoidal, como se puede observar en la figura 19.

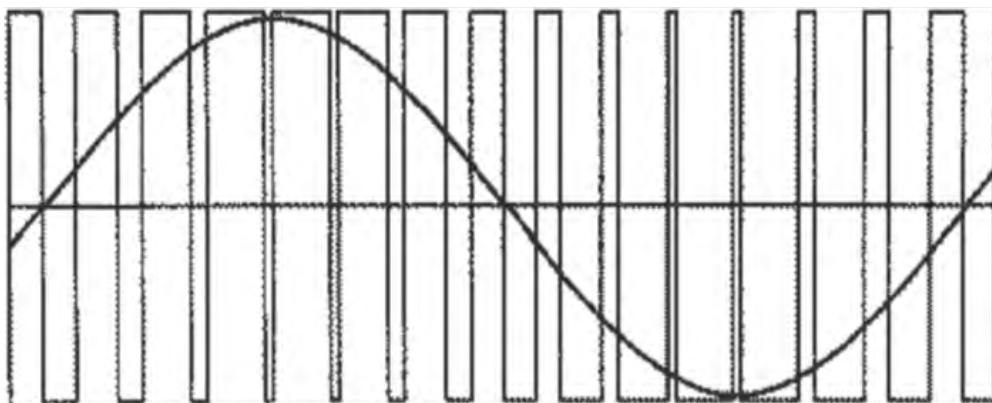


Figura 19. Modulación de una señal PWM para obtener un valor eficaz senoidal.

Se generará así la señal senoidal de control puesto que es muy sencillo para un hardware actual basado en microprocesador generar una señal PWM con una buena precisión, pero es mucho más complicado generar una señal senoidal analógica pura de forma precisa y tan rápida.

No obstante, esta señal PWM no puede ser usada directamente para controlar los motores. La corriente de las señales provenientes de los microprocesadores es mínima, no tiene apenas potencia, por este motivo se debe amplificar en una etapa de potencia. También existe otro problema, y es que aunque la señal PWM del microprocesador tuviese potencia suficiente, hay que recordar que la corriente que se debe proporcionar a las fases del motor cambia de signo, fluye en ambos sentidos, y un microprocesador produce señales entre un valor cercano a 0 como valor bajo, y un valor alto, por lo tanto aunque se generase una señal senoidal, ésta tendría su "offset" o punto medio con un valor por encima de 0, y para conmutar correctamente las fases se necesita que esta señal senoidal esté centrada estrictamente en 0, ya que la corriente positiva y negativa máxima que proporcionemos a las fases deben ser de la misma magnitud, para que las fuerzas de atracción y repulsión resultantes entre las bobinas y los polos sean del mismo valor, y el torque del motor sea constante.

La mejor forma de conseguir esto es mediante la mitad de un puente H, "half H bridge" como el de la figura 20, donde A, B Y C corresponden con la conexión a cada fase del motor.

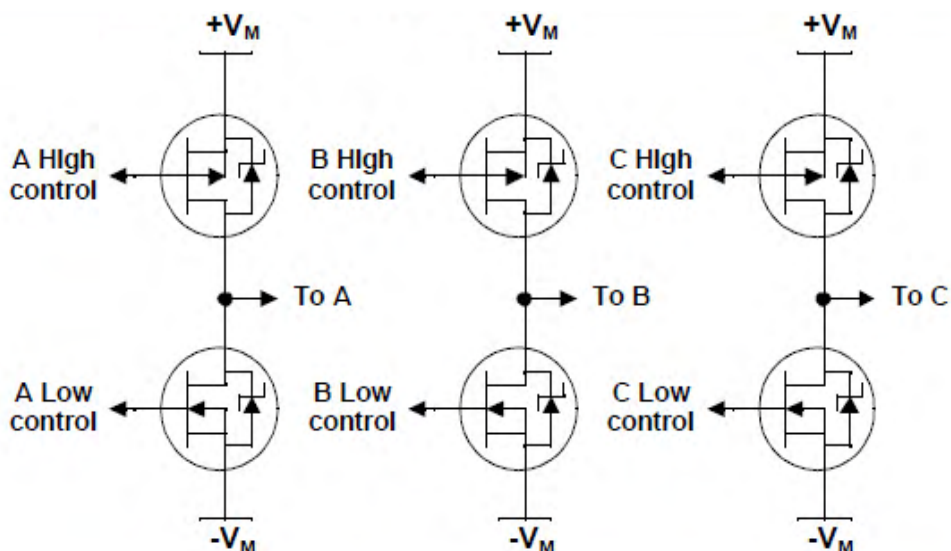
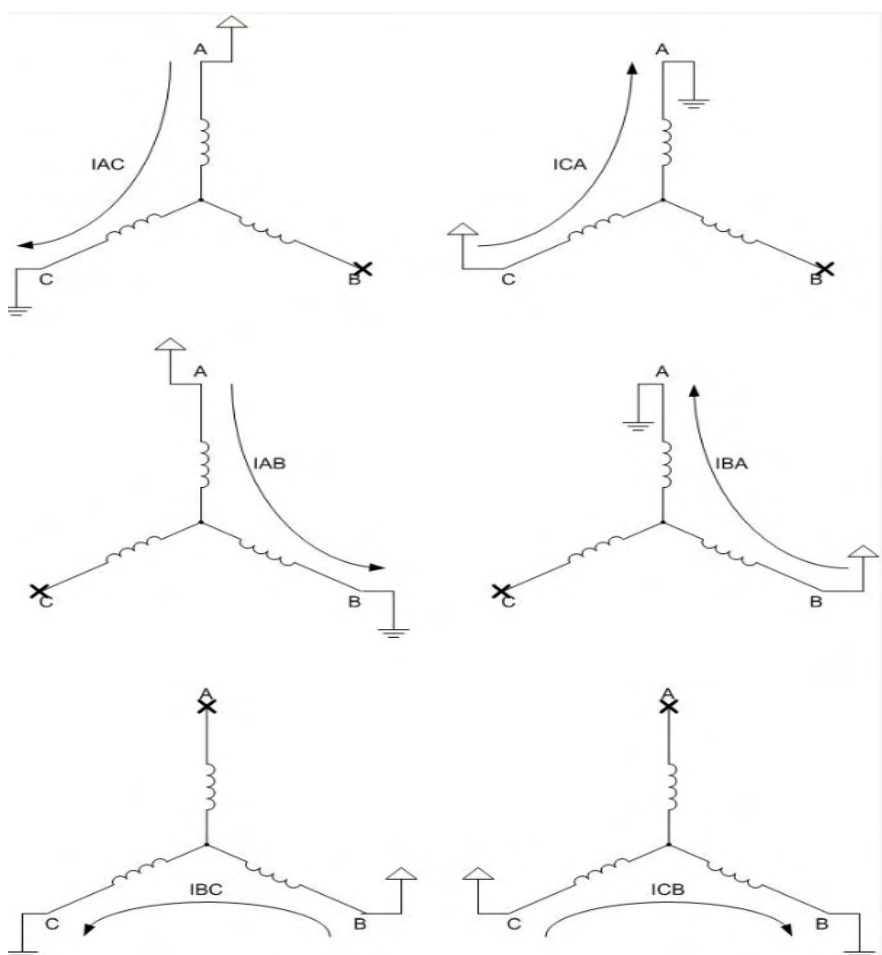


Figura 20. Half H bridge.

De este modo, observando la figura 20, se llamará parte alta a los transistores que se encuentran encima de las conexiones a las fases, y parte baja a los de la parte inferior. Gracias a la forma de funcionar de los transistores, administrando una pequeña cantidad de corriente a su “gate” o puerta, siendo éstas las marcadas como control en cada uno de los transistores en la figura 20, se consigue que a través de las los otros dos terminales del mismo pase una corriente mucho mayor, pero proporcional a la que se le suministra a través de su puerta. Por este motivo, un transistor puede comportarse como un interruptor, abriendo o cerrando el circuito conforme le apliquemos o no corriente a su puerta. El funcionamiento del *half H bridge* se basa en este fenómeno.

En un *half H bridge*, durante el funcionamiento de un motor bldc, y suponiendo que éste se gobierna mediante un control de seis puntos, no senoidal, para simplificar la explicación, en todo momento habrá un transistor de la parte alta del puente, y un transistor de la parte baja cerrando el circuito, permaneciendo los demás transistores sin aplicarles corriente a su puerta, es decir, como si fuesen un interruptor abierto. En ningún



momento habrá más de dos transistores cerrando el circuito, siempre va a haber uno de la parte alta y otro de la parte baja, si no no sería posible cerrar el circuito, y éstos nunca van a corresponder a la misma fase, en cuyo caso no se energizaría ninguna fase si no que se cortocircuitaría el sistema. En la figura 21 se puede observar todas las posibles combinaciones de sentido y orientación de la corriente en las fases del motor que se pueden conseguir combinando la conmutación de éstos transistores.

Figura 21. Posibles caminos que sigue la corriente a través de las fases en un motor BLDC.



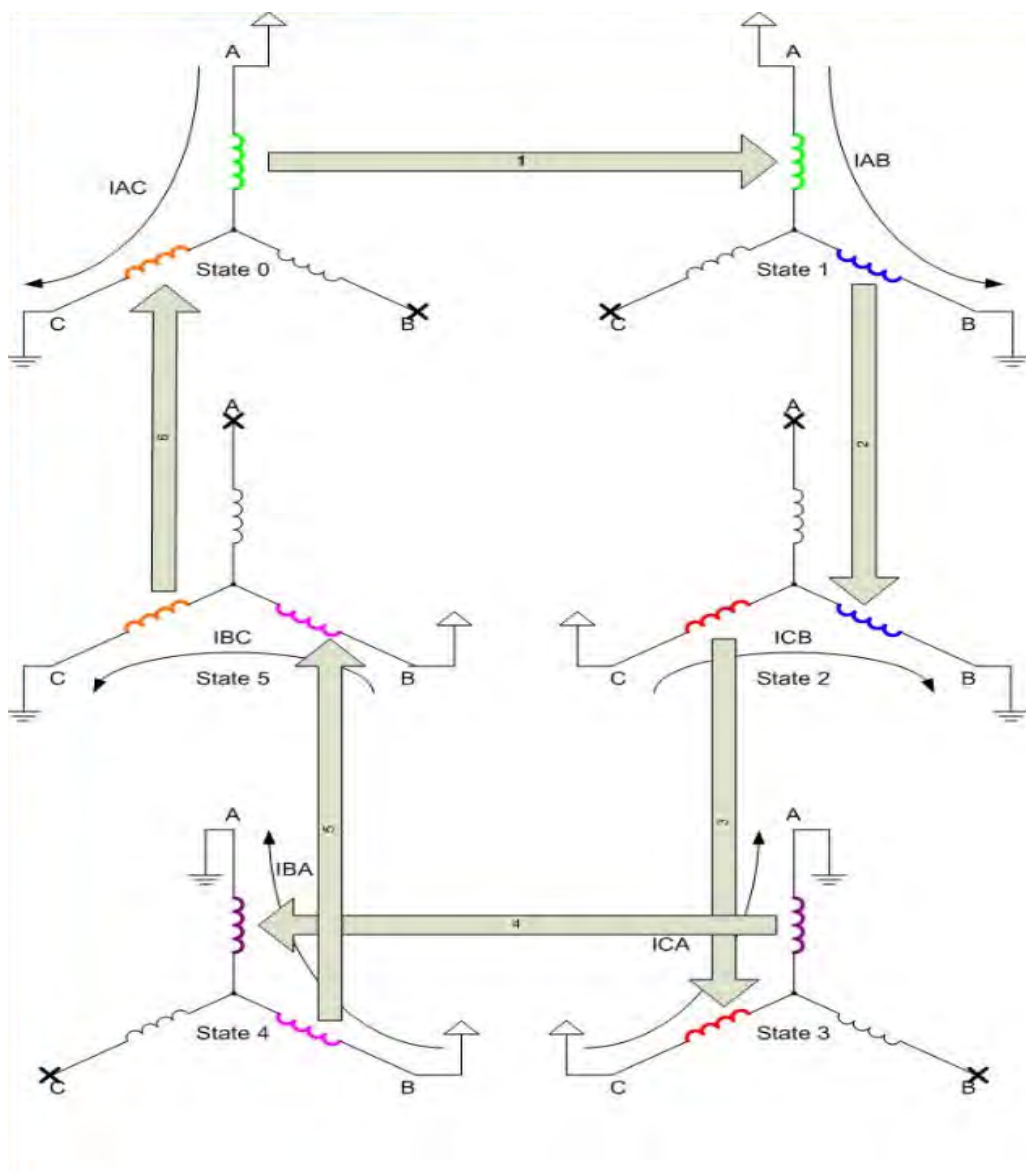


Figura 22. Secuencia de conmutación de las fases en un motor BLDC.

Es importante mencionar también, que la conmutación de fases se hace siempre de tal modo que sea más sencillo para el camino que ha de seguir la corriente. Así, siempre se conmuta el *half H bridge* de tal modo que de un paso al siguiente, se modifique lo menos posible el camino de la corriente. Así se consigue minimizar los efectos inductores de las bobinas, y también es mucho menos costoso para la electrónica que efectuar un cambio de sentido completo de la corriente a través de las fases.

La secuencia normal de conmutación de las fases sería la que se muestra en la figura 22. Como se puede observar, en cada paso únicamente se modifica el camino que sigue la corriente en una de las fases. Invertiendo el sentido en el que se sigue la secuencia se invertiría el sentido de giro del motor. Cada paso de esta secuencia correspondería a cada punto de los usados en el tipo de control por 6 fases mencionado anteriormente.

Se puede observar como en cada paso existe una fase desenergizada, y es en la que se mediría la BEMF en caso de usar ese tipo de control, mientras que las otras dos fases están energizadas, pero por la forma del bobinado, la corriente entra en diferentes sentidos en cada fase, lo que provoca fuerzas magnéticas opuestas, tal y como se desea para el correcto funcionamiento del motor.

Un ejemplo de como se manejaría el *half H bridge* en uno de los pasos de esta secuencia se puede contemplar en la figura 23.

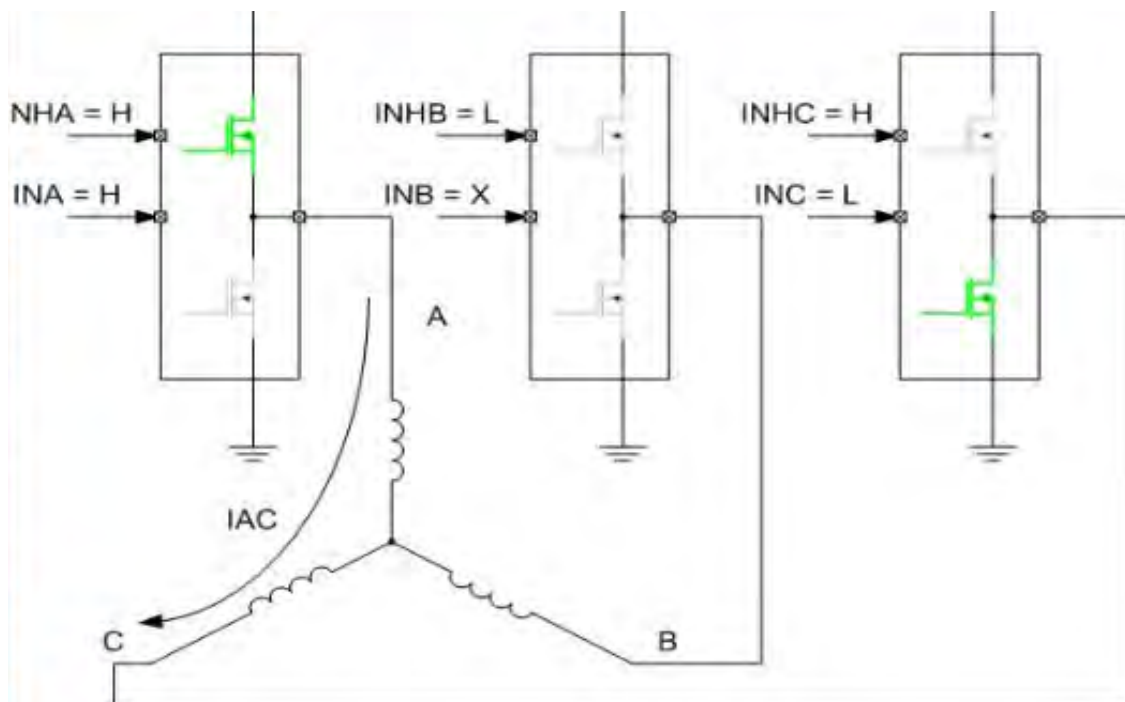


Figura 23. Esquema de como se conmutaría el *half H bridge* para una secuencia de control.

De este modo, este sistema se puede aplicar para la forma de control por onda senoidal, en lugar de 6 pasos como se ha explicado en el tipo de control por 6 puntos, en los que los transistores se usan como meros interruptores. Recordando que los transistores dejan pasar una corriente proporcional a la pequeña señal que le mandemos a través de su puerta, podemos modular una señal senoidal en pwm, que será la que les aplicaremos a los transistores en lugar de una señal “todo o nada”. Así, podemos controlar cada uno de los 3 motores bldc de la *gimbal* con una señal senoidal para que su comportamiento a bajas revoluciones sea gobernable.

En el software encargado de gobernar los motores, se parametrizará el valor de la señal senoidal que se ha de mandar a cada una de las tres fases en cada instante de la revolución eléctrica del motor. De este modo, para cada posición angular eléctrica del motor existiría una combinación de valores de corriente que se le habrían de proporcionar a cada fase para que el rotor del motor se mantuviese en esa posición. Al estar todas las fases energizadas con los valores correspondientes, las fuerzas de atracción y repulsión producidas en las bobinas se contrarrestan para que la resultante sea nula, y el rotor se mantenga en una posición fija. Cambiando el valor de corriente que se proporciona a cada fase acorde con la forma de onda senoidal, y respetando el desfase de 120 grados entre ellas, se consigue un movimiento suave del motor, incluso cambio de sentido de rotación en caso de cambiar el valor de las señales en sentido contrario, y a muy baja velocidad, pudiendo incluso a dejar el motor bloqueado.

En la *gimbal*, se partirá de que el punto de equilibrio es que estos motores están en este estado de bloqueo. Cuando el UAV cambie de actitud, se moverá el rotor de los motores para seguir manteniendo la actitud de la cámara estable en el espacio, hasta que la actitud del UAV se vuelva a estabilizar y los motores vuelvan a bloquearse.

Todo lo descrito hasta ahora sería suficiente si los motores solo se moviesen a una velocidad reducida, y sin carga, sólo con la inercia de su propio rotor. De este modo, el rotor al no tener prácticamente inercia puede seguir fácilmente a la rotación a la que se le está forzando al cambiar el valor de la corriente suministrada a las fases. Pero cuando un motor se encuentra bajo carga, aunque desplazemos el valor de la corriente suministrada a las fases para que el rotor se desplace acorde con ella, consiguiendo la rotación del mismo, puede que la inercia que tiene que mover el motor no le permita realizar dicha rotación. De éste modo, por ejemplo, si al motor se le está variando la corriente de las fases de tal modo que describa un giro de 20 grados, pero cuando el valor de la corriente ya ha llegado al valor que le corresponde con la nueva posición desfasada 20 grados el rotor aún no ha llegado físicamente a ese punto, por que la velocidad a la que ha cambiado la corriente en las fases sea más rápida que la velocidad a la que puede mover

la carga, se daría la situación en la que no habría ningún tipo de concordancia entre la posición del rotor y la corriente suministrada a las fases, y se perdería por completo el control del motor, al desconocer la posición relativa del rotor con el estator. Para evitar esto, se necesita algún modo de conocer la posición angular del motor para así poder corregir el posible desfase existente entre la “posición eléctrica” comandada por la corriente suministrada a cada fase, y la posición relativa del rotor con respecto a ésta.

### 5.3.2- Fundamentos electrónicos: IMU

IMU responde a las siglas de *Inertial Measurement Unit*, unidad de medida inercial. Normalmente poseen dos tipos de sensores, giróscopos y acelerómetros cuyo funcionamiento se describirá a continuación, pero también pueden llevar barómetro o incluso gps. La función de esta serie de sensores es recoger toda la información posible sobre la actitud de la IMU, y en el caso de incluir barómetro y gps también hace posible que recoja información sobre altura, posición, velocidad y aceleración.

La IMU que se va a contemplar es de 6 grados de libertad, consistente en un giróscopo y un acelerómetro, ambos de 3 ejes.

Un acelerómetro es un sensor que mide aceleraciones. Al ser este de 3 ejes, contempla aceleraciones con cualquier dirección en el espacio. La función principal de este sensor, es medir la dirección de la fuerza de gravedad relativa al mismo. De este modo, se puede averiguar la posición relativa de este sensor con respecto a la tierra, información crucial si se necesita estabilizar un objeto.

La forma en que se recoge información del mismo es con un vector de la aceleración en cada uno de sus tres ejes, lo que corresponde con la proyección de la aceleración total sobre cada uno de dichos ejes, como se observa en la figura 24. Una vez conocidos estos tres valores, mediante software se hacen los calculos pertinentes para obtener el vector total de aceleración y trabajar con él.

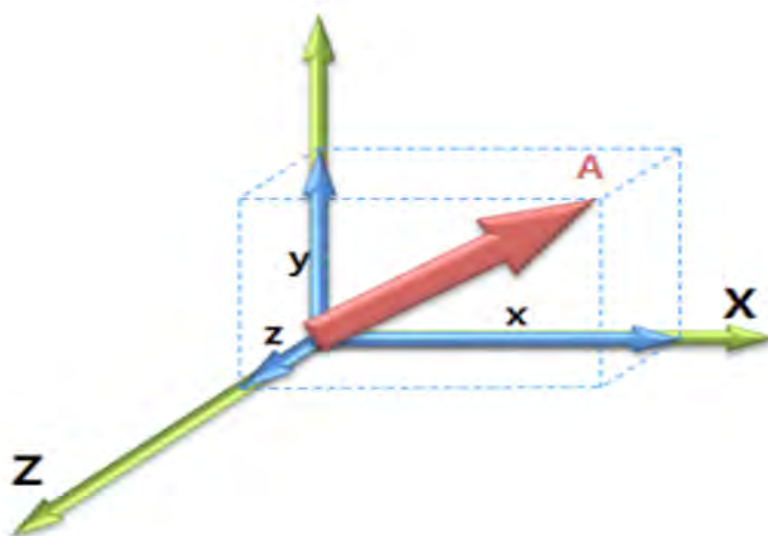


Figura 24. Componentes de la aceleración medidas con un acelerómetro

El otro sensor presente en la IMU que se contempla es un gir6scopo de tres ejes, y mide velocidades angulares en cada uno de 6stos.

Como se ha comentado anteriormente, la funci3n 6ltima de este sensor es obtener informaci3n de la actitud del mismo. Si el sensor se encontrase en absoluto reposo, y 6nicamente se rotase sobre s3 mismo, con el aceler3metro ser3a suficiente para obtener esta informaci3n, ya que al no existir movimiento en el espacio la 6nica aceleraci3n existente ser3a la de la gravedad. La realidad es que en la inmensa mayor3a de las situaciones la imu no va a estar en reposo, y por lo tanto el aceler3metro medir3 tanto la gravedad como las aceleraciones din3micas del sensor, las correspondientes a su movimiento en el espacio. Por este motivo, las mediciones de actitud provenientes de un acelerometro van a contener mucho ruido.

Por otra parte, la estimaci3n de la actitud mediante las mediciones obtenidas en un gir6scopo se hacen integrando los valores obtenidos a lo largo del tiempo entre mediciones. Es decir, recordando que los valores que lee este sensor son velocidades angulares, multiplicando el valor de esta velocidad por el tiempo al que ha estado girando a dicha velocidad, se puede obtener la posici3n angular. El problema de obtener la actitud de este modo, es que por muy corto que sea el tiempo entre mediciones, siempre va a haber un intervalo de tiempo en el que no se est3 midiendo. A corto plazo esto no es un problema, pero a largo plazo este peque1o error se va acumulando, y se produce lo denominado como deriva o “drift” del sensor.

De este modo, se tiene que el aceler3metro es un sensor que a corto plazo mide mucho ruido para determinar la actitud, es muy inestable, pero a largo plazo no deriva, es decir, la media de los valores leidos de un aceler3metro a largo plazo es muy exacta. Por otra parte, el gir6scopo es un sensor que a corto plazo es muy exacto, pero a largo plazo acumula error. Por ello, para obtener la lectura real de la actitud de la IMU en todo momento es necesario combinar las mediciones de ambos sensores. Para llevar a cabo esta combinaci3n, existen varios tipos de modelos matem3ticos llamados filtros.

El filtro elegido para esta aplicaci3n es un filtro de Kalman. Hay muchas formas diferentes de implementar este filtro, pero su funcionamiento es b3sicamente integrar las lecturas del gir6scopo a lo largo de algunos muestreos, de este modo se obtiene el desplazamiento angular, y contrastarlo con las medidas del aceler3metro, para de este modo discernir que componente de la aceleraci3n total corresponde a la gravedad y c6al corresponde a la aceleraci3n din3mica, para as3 poder establecer la actitud del sistema en el espacio. Este tipo de algoritmo tambi6n incluye una serie de medidas preventivas para desechar la lectura de ruido proveniente de vibraciones.

#### 5.4- Fundamentos de control: controlador PID

De los apartados anteriores se tiene la necesidad de alguna clase de *feedback* para conocer la posición relativa del rotor de los motores con respecto a su estator en todo momento, y también se sabe que una IMU puede medir la actitud en el espacio.

Así, colocando una IMU en el mismo soporte de la *gimbal* en el que colocaremos la cámara, podemos tener una referencia de la actitud de ésta para realimentar el control de los motores, conocer la posición angular de éstos y cerrar así el bucle de control.

Este control se gestionará mediante un controlador PID basado en error. Este tipo de controladores se pueden usar en aplicaciones muy diversas, por lo tanto se explicará su funcionamiento en torno a esta aplicación concreta, para no generalizar tanto la explicación. Antes de introducir los principios de funcionamiento de este tipo de controlador, se aclararán algunos conceptos.

Se entiende como punto de equilibrio el estado en el cual se quiere tener la cámara estabilizada en un momento dado frente a perturbaciones en el UAV, es decir, la actitud en el espacio de la cámara, deseada en un momento dado.

Cualquier movimiento angular que aleje la cámara de ese punto de equilibrio, será considerado error por el controlador PID. Este error se medirá en forma de grados, y puede producirse de dos formas diferentes:

- Perturbaciones externas: Los cambios en la actitud del UAV generarán cambios en la actitud de la carga de pago, que el controlador PID tomará como error que le aleje de su punto de equilibrio, y por lo tanto tendrá que corregir.

- Apuntamientos intencionados: Además de estabilizar la cámara en el espacio, la carga de pago también ha de ser capaz de mover la cámara para apuntar a diferentes objetivos. Este apuntamiento se le inducirá al controlador PID en forma de error del siguiente modo.

Imaginando una situación en la que el UAV está en vuelo, y la cámara está en un punto de equilibrio en el cual está apuntando hacia el norte, con un ángulo de *roll* igual a 0 grados (alineada con el horizonte), y un ángulo de *pitch* también de 0 grados, es decir, mirando hacia delante. La cámara está mirando hacia delante, pero se quiere apuntar a un objetivo que se encuentra justo debajo del UAV. De

este modo, se necesita girar el motor de *pitch* 90 grados hacia abajo, para apuntar hacia el suelo y captar el objetivo deseado. Dicho apuntamiento se realizaría “diciéndole” al controlador PID que el punto de equilibrio en el que se encuentra ya no es el punto de equilibrio, si no que el nuevo punto de equilibrio se encuentra girando el motor de *pitch* 90 grados hacia abajo. Este cambio en el punto de equilibrio se induciría como un error en *pitch* de 90 grados, que el controlador PID tendría que corregir, dirigiendo la cámara a su nuevo punto de equilibrio.

Este error puede ser tomado por el controlador PID de varias formas. Por un lado se tiene el error instantáneo, que se refiere al error que separa el estado del sistema del punto de equilibrio en un instante dado, al cual se le llamará  $e_p$ . Este error es el que toma el controlador cada instante que gestiona un ciclo de control. Se entiende como ciclo de control al proceso de leer mediciones de la IMU, establecer el error que existe en esas mediciones con respecto al punto de equilibrio y gestionar como se tiene que mover cada motor para corregir ese error. Este ciclo de control se lleva a cabo continuamente, y cuanto mayor sea la cantidad de veces por segundo que se lleva a cabo dicho ciclo, el sistema se controlará de manera más precisa y suave.

Por otra parte, se tiene el error acumulado. A diferencia del error instantáneo, que solo tiene en cuenta el error en cada ciclo concreto, el error acumulado tiene en cuenta los errores instantáneos que se han estado acumulando en instantes previos. Al realizar el ciclo de control varias veces por segundo, siempre se va a tardar varios ciclos en corregir una perturbación por completo. Por este motivo, siempre va a existir un error acumulado, al que llamaremos  $e_i$ . El valor de este error es la suma de todos los errores instantáneos en el periodo de tiempo considerado, es decir, desde que se ha producido la perturbación. De este modo, el valor de este error es igual al valor de la integral del error desde que se produjo la perturbación hasta el instante actual.

Por último se considerará la velocidad a la que se reduce el error, o lo que es lo mismo, la derivada del error instantáneo desde que se produjo la perturbación hasta el momento actual, al que llamaremos  $e_d$ .

Volviendo a cómo trabaja este tipo de controlador, cada una de las siglas PID corresponde a una de las 3 ganancias diferentes que actúan en cada ciclo de control. De este modo, se tiene:



-Ganancia Proporcional: En cada ciclo de control, esta ganancia actúa sobre el error instantáneo. De este modo, para un valor de ganancia  $P$  igual a  $K_p$ , este controlador actuará en sentido contrario al error, para corregirlo, con un valor de  $K_p$  multiplicado por el valor  $e_p$  del error instantáneo.

En aplicaciones menos exigentes que esta, es posible mantener el sistema en el punto de equilibrio solo con ganancia  $P$ . El problema de usar solo esta ganancia, es que para un sistema que requiere de tanta rapidez de respuesta como una estabilización de imagen, la ganancia  $P$  debe ser lo suficientemente alta como para devolver el sistema al punto de equilibrio ante una perturbación rápida. El problema es que al elevar tanto esta ganancia como para conseguir que esta respuesta sea razonablemente rápida, cuando el sistema está volviendo al punto de equilibrio lleva demasiada velocidad, como consecuencia de la alta ganancia  $P$  que ha actuado multiplicando al error, y por lo tanto se pasa de este punto, volviendo a tener un error pero esta vez en el sentido contrario. Al ocurrir esto, existe de nuevo error instantáneo en el sentido opuesto, y la ganancia  $P$  actúa para volver a corregirlo, repitiéndose este proceso de oscilación hasta que finalmente se establece en el punto de equilibrio. Esta oscilación es fatal para una estabilización de imagen.

Si por el contrario se baja la ganancia  $P$ , se podría conseguir eliminar esta sobreoscilación, pero el sistema no tendría una respuesta lo suficientemente rápida como para corregir las perturbaciones antes de que sean perceptibles en la imagen, o incluso podría ocurrir que ni siquiera fuese capaz de corregir la perturbación.

Por este motivo, una ganancia  $P$  por si sola es insuficiente para esta aplicación.

-Ganancia Derivativa: Esta ganancia usa el valor de la derivada del error instantáneo, es decir, la velocidad a la que este error está decreciendo como consecuencia de la acción de la ganancia  $P$ . De este modo, la ganancia  $D$  actúa multiplicando su valor  $K_d$  por el de la velocidad del error,  $e_d$ , y actúa en sentido contrario al que lo hace la ganancia  $P$ . De este modo, cuanto mayor sea la velocidad a la que el sistema esta volviendo a su punto de equilibrio, con mayor fuerza actúa esta ganancia frenando esa velocidad, actuando a modo de amortiguador. Así, se puede elevar la ganancia  $P$  para que tenga una respuesta lo suficientemente rápida para estabilizar la cámara sin que se produzca la sobreoscilación mencionada anteriormente, puesto que antes de que se produzca

dicha sobreoscilación, la ganancia D actúa en contra de la corrección para frenarla antes de que se pase del punto de equilibrio.

Ante una ganancia D insuficiente, el sistema sobreoscilaría, puesto que esta ganancia no tendría fuerza suficiente para amortiguarlo por completo. Un sistema con estas características es denominado sistema subamortiguado.

Si por el contrario la ganancia D es demasiado alta, frenaría demasiado la acción de la ganancia P, ralentizando la rapidez de estabilización del sistema. Cuando esto ocurre se denomina al sistema sobreamortiguado. Es posible que incluso la ganancia D frene el sistema por completo antes de llegar al punto de equilibrio, por lo que se tendría un error permanente en el sistema que la ganancia P no sería capaz de corregir por sí sola, puesto que ésta únicamente tiene en cuenta el error instantáneo.

Incluso en el caso en el que la ganancia P y D sean apropiadas para el sistema, la *gimbal* en cuestión tendrá perturbaciones muy diferentes en magnitud y velocidad, por lo tanto es inevitable que en algún momento aparezca un error permanente que las ganancias P y D por sí solas no serán capaces de corregir.

Es importante mencionar que aunque un pequeño exceso de ganancia D no sea notablemente apreciable en cuanto a la respuesta del sistema, es posible que empeore su funcionamiento debido a que amplifique las vibraciones de las mediciones medidas por la imu. Estas vibraciones son un error  $e_p$  muy pequeño, por lo tanto la ganancia P no se ve afectada apenas, pero si estas vibraciones tienen una frecuencia lo suficientemente alta la velocidad a la que el error derivado de estas vibraciones se mueve hará que la ganancia D actúe, perturbando la estabilidad del sistema. Por este motivo, es de utilidad colocar un filtro paso bajo antes de la entrada de de al controlador D, para que ignore las perturbaciones que se produzcan por encima de esa frecuencia, y solo trabaje con las que realmente representan el estado del sistema y no las vibraciones del mismo. Obviamente, estas vibraciones también son perjudiciales para la calidad de la imagen, por lo tanto cuanto más se aisle la *gimbal* de cualquier tipo de vibración será mejor para el sistema.

-Ganancia Integral: La función de esta ganancia es eliminar el error permanente anteriormente descrito. Para hacerlo, trabaja con el error acumulado  $e_i$ . En cada ciclo de control, esta ganancia actúa con un valor  $K_i$  multiplicado por el error acumulado  $e_i$ , en el mismo sentido que lo hace la ganancia P, es decir, corrigiendo

el error. De este modo, aunque en un momento dado la ganancia  $P$  no sea suficiente para corregir un error permanente como consecuencia de que el error instantáneo haya desaparecido, o sea de un valor demasiado pequeño como para que al multiplicarlo por  $K_p$  sea eficaz para devolver el sistema al punto de equilibrio, actúa la ganancia  $I$ . Si existe error permanente en un ciclo de control, se va a ver reflejado en el error acumulado  $e_i$ , puesto que su valor es la suma de la sucesión de errores instantáneos desde que se ha producido una perturbación. De este modo, la ganancia  $I$  actuará con más fuerza para devolver el sistema al punto de equilibrio cuanto mayor tiempo haya transcurrido sin volver al mismo desde que se produjo la perturbación.

Si la ganancia  $I$  es demasiado alta, puede tener el mismo efecto que un exceso de ganancia  $P$ , sobreoscilación. Por este motivo, la calibración de un sistema basado en controlador PID habitualmente se hace calibrando primero la ganancia  $P$  y  $D$ , para obtener la respuesta instantánea deseada, y posteriormente se eleva la ganancia  $I$  justo hasta que sea suficiente para corregir el error permanente. Este valor suele ser muy pequeño en proporción con el de la ganancia  $P$  y  $D$ , por lo tanto si el sistema ha sido calibrado en su respuesta instantánea correctamente con los valores de las ganancias  $P$  y  $D$ , al elevar el valor de la ganancia  $I$  esta respuesta instantánea no debería verse afectada.

Combinando estos tres tipos de ganancia se puede conseguir que el sistema estabilice a la perfección las perturbaciones inducidas por el UAV. No obstante este tipo de controlador tiene un problema, y es que para controlar el sistema supone que su respuesta es lineal en torno al punto de equilibrio. Esto significa que el controlador PID supone que la corrección que va a mandar a los motores en todo momento va a afectar del mismo modo al sistema. Esto es cierto siempre y cuando siempre se trabajase en las proximidades del mismo punto de equilibrio, pero en esta aplicación no siempre va a ser así.

Esta *gimbal* va a tener muchos cables enrutados a través de cada articulación, los cuales van a ofrecer resistencia mecánica al movimiento de los motores. Es muy probable que dichos cables no ofrezcan la misma cantidad de resistencia mecánica cuando, por ejemplo, la cámara está mirando hacia delante que cuando está mirando hacia abajo, puesto que los cables se han “enrollado” alrededor del eje móvil provocando una resistencia diferente. Aunque esta variación en la resistencia mecánica que ofrecen los cables sea mínima, va a afectar a la respuesta del sistema, puesto que el controlador PID espera que el torque que aplica a cada motor para corregir las perturbaciones va a afectar

al sistema del mismo modo en todo momento, pero si estos cables ofrecen un poco más de resistencia, el mismo torque aplicado al motor tendrá un efecto diferente que cuando los cables ofrecen un poco menos de resistencia. Del mismo modo ocurre con el equilibrado de la *gimbal*. Aunque la *gimbal* esté equilibrada en torno a cada eje, es muy complicado que este equilibrio sea perfecto, por lo tanto puede que ante diferentes orientaciones de la cámara, el equilibrado de la *gimbal* se perturbe en algún eje, a lo que el motor que controla dicho eje tendrá que lidiar con mover el peso correspondiente a dicho desequilibrio además de la inercia correspondiente a la masa de la cámara.

Otra forma en la que el sistema pierde linealidad, y de una forma extremadamente más acusada que en los ejemplos anteriormente citados, es cuando la *gimbal* se acerca al *gimbal lock* aunque no haya llegado a él. Recordando que, cuando este fenómeno ocurría, dos de los ejes alrededor de los cuales se estabiliza la cámara dejaban de ser perpendiculares para acercarse a ser paralelos, el efecto que el controlador PID espera que tenga la aplicación de torque sobre los motores será muy diferente al efecto que realmente se producirá, puesto que cuando se actúe sobre un motor, además de la respuesta en el eje de Euler que mueve dicho motor se obtendrá un movimiento en el eje de Euler al que se está acercando. El controlador PID espera que los ejes de Euler sean ortogonales entre sí, puesto que la ortogonalidad de los mismos afecta directamente a la respuesta en la cámara que van a tener, y ante *gimbal lock*, o una situación cercana a este fenómeno la respuesta que el controlador PID espera obtener es extremadamente diferente a la real.

El esquema de controlador PID que se ha elegido para esta aplicación es muy similar al propuesto por el departamento de robótica de ETH Zurich, la Escuela Politécnica Federal de Zurich, en las publicaciones que explican el funcionamiento del autopiloto que han desarrollado, Px4. Al gestionar éste la estabilidad en los 3 ángulos de Euler de una aeronave es lo suficientemente similar a esta aplicación como para tomarlo como referencia.

En la figura 25 se puede observar el diagrama de bloques de este controlador. La única diferencia significativa para adaptarlo a una *gimbal* es que en lugar de ESC (Electronic Speed Controller) para controlar los motores se usará un hardware diferente, y en lugar de mover éstos un *airframe* moverían la *gimbal*.

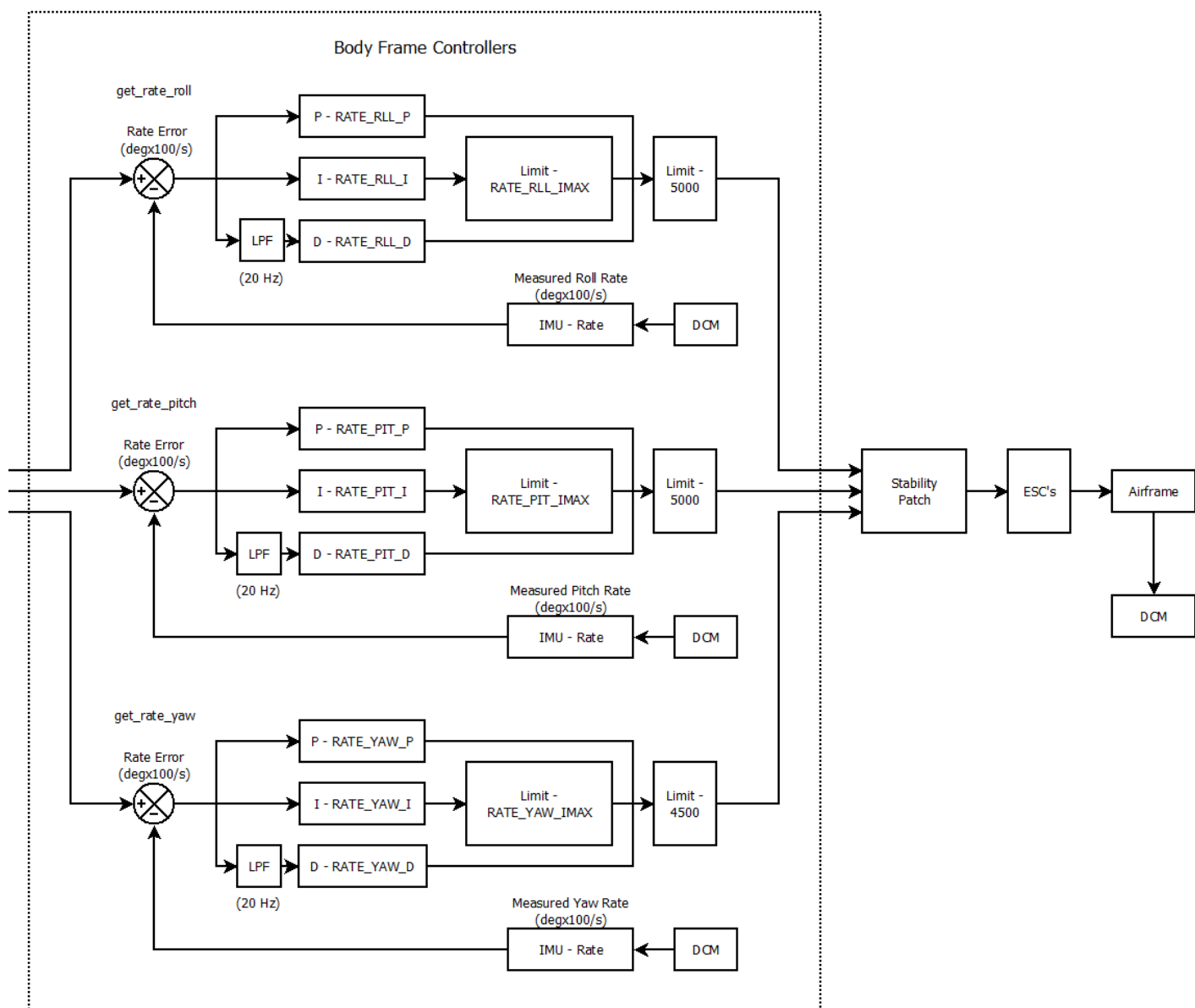


Figura 25. Diagrama de bloques del regulador PID del autopiloto Px4 de ETH Zurich.



## *6- DESARROLLO DE PROTOTIPOS Y RESULTADOS*

En esta sección se explicará la construcción de los primeros prototipos de esta nueva versión de la carga de pago para el UAV Mantis, los problemas surgidos durante el proceso y como se ha aprendido de ellos hasta llegar a la versión final.

Estos prototipos se han construido de una manera muy artesanal, intentando agilizar al máximo la rapidez de la construcción y minimizar los costes de ingeniería asociados a ella.

En un modelo final las técnicas de construcción serían mucho más avanzadas, en el caso de las piezas de material compuesto se habría modelado primero en 3D, para posteriormente fabricar el molde mediante corte por control numérico automatizado, del cual se habrían sacado las piezas finales. En el caso de las piezas que no son de material compuesto, se habrían fabricado en plástico de alta calidad, bien impreso en 3D mediante láser o al igual que en el caso de las piezas de material compuesto mediante molde. Obviamente el coste de ingeniería de usar este tipo de procesos no está justificado si no se va a producir una cierta cantidad de unidades. Además, al construir prototipos es de esperar que la versión se modifique conforme se vayan encontrando mejoras. Por estos motivos se han construido los prototipos usando estas técnicas menos sofisticadas, además de la rapidez con la que se pueden obtener modelos funcionales, sin tener que depender del previo diseño y manufactura de las diferentes piezas.

### 6.1.1- Versión en dos ejes: Proceso de construcción.

El primer prototipo que se construyó para este proyecto fue partiendo del diseño de la carga de pago existente. Como se explicaba en la introducción, esta carga de pago poseía dos ejes, uno longitudinal para el movimiento de *roll*, y uno transversal para *pitch*, contenido en el eje previo, tal y como se observa en la figura 26.

Al tener sólo dos ejes, es decir, dos grados de libertad, esta *gimbal* no sufría los problemas derivados del *gimbal lock*, pero además de los problemas derivados del uso de servos, al apuntar mediante *roll* y *pitch*, cuando la cámara apuntaba hacia los lados la imagen se veía rotada 90 grados. Esto hacía complicado orientarse correctamente observando las imágenes transmitidas por el UAV.



Figura 26. Carga de pago antigua sin la tapa externa

En esta primera versión se decidió trabajar sobre el modelo existente como punto de partida, adaptando la tecnología de *gimbal brushless* a la *gimbal* de dos ejes existente en esta carga de pago. Para ello, se eliminaron los servos que se usaban previamente para el control de la misma, y todos los cables de alimentación y control relacionados con



ellos, dejando exclusivamente la electrónica necesaria para hacer funcionar la cámara. De este modo, se podría tener una buena visión del espacio disponible para albergar los motores.

Como se puede observar en la figura 27 el servo de *roll* movía toda la estructura en la que está contenida el eje de *pitch*. Esta estructura tiene forma de aro, en el que se se engancha la cubierta de carbono que cubre todo el conjunto.

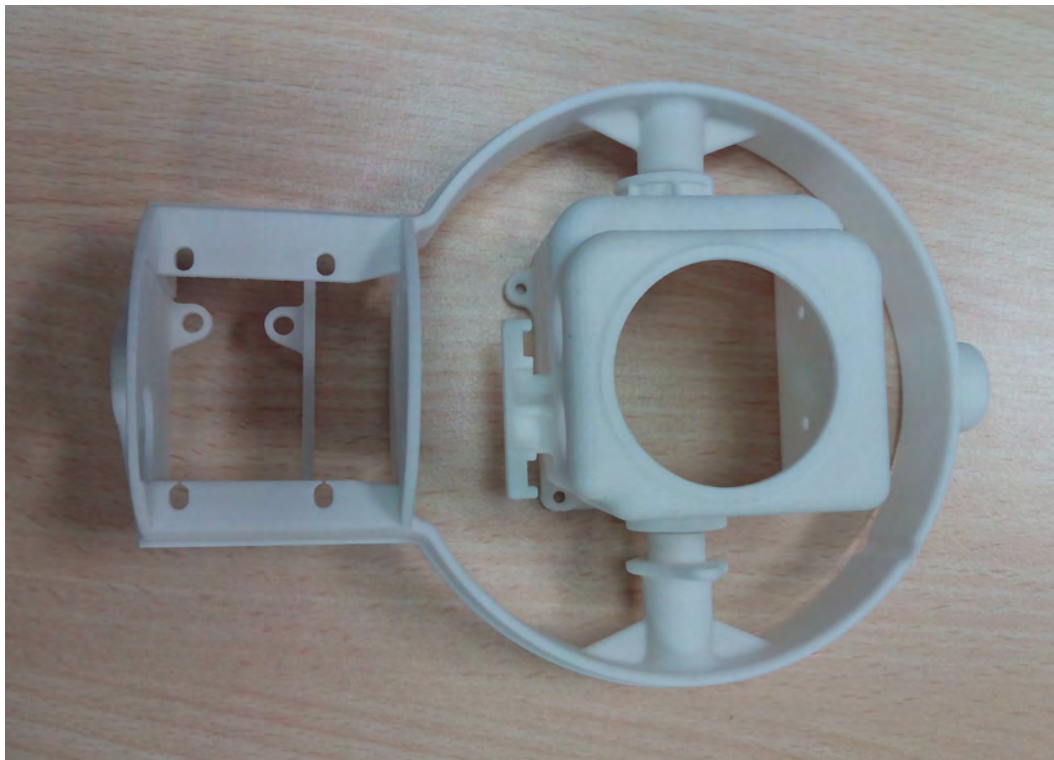


Figura 27. Estructura de la *gimbal* de la carga de pago antigua

Como se puede observar, al desmontar toda la electrónica se aprecia un hueco en uno de los lados de la carcasa de la cámara, el cual con algunas modificaciones se aprovecharía para colocar el motor del eje de *pitch*. Las acciones llevadas a cabo para adaptar el motor a este espacio fue cortar el “pivote” sobrante y fijar con resina epoxy una bancada en fibra de carbono, tal y como se muestra en la figura 28.



Figura 28. Detalle de la bancada del motor de *pitch*.

El motor para mover el eje de *roll* era ligeramente más grande que el motor de *pitch*, puesto que necesita mover una masa mayor al contener no solo la cámara, si no toda la estructura mostrada en la figura 28. Además, al colocar las cubiertas de carbono en dicha estructura, el espacio existente entre las cubiertas y la carcasa de la carga de pago es extremadamente ajustado como se puede observar en la figura 29 y en ocasiones en este

espacio quedaba atrapada suciedad como consecuencia de los aterrizajes en el campo, y hacía que existiese un poco de rozamiento entre la parte móvil y la carcasa. Por este motivo se escogió un motor sobredimensionado para este eje.



Figura 29. Detalle del espacio entre la parte móvil y la parte fija de la carga de pago.



Al ser el motor de *roll* demasiado grande como para emplazarlo dentro de esta estructura, se optó por acomodar un espacio disponible en la punta de la carga de pago. Para que este motor moviese toda la estructura del eje de *roll* se prolongó el eje frontal de dicha estructura, y el motor se montó sobre el mismo eje prolongado, como se puede observar en la figura 30.



Figura 30. Detalle del emplazamiento del motor de *roll*.

La pieza de aluminio que se observa en la parte superior del motor en la figura 30 es la encargada de unir el rotor del motor de *roll* con el eje prolongado de la estructura de la *gimbal*, fue la única pieza que se tuvo que mecanizar para este prototipo, pero era necesario fabricarla con una relativa precisión puesto que de ella dependía que el eje de giro de toda la estructura estuviese centrada con el eje de giro del motor.

Una vez colocados los motores en su sitio y habiendo comprobado que su eje de giro coincidía con el eje de giro deseado de la estructura, se procedió al equilibrado de todas las partes de la *gimbal*, en sentido ascendente, es decir, empezando por el eje que sólo mueve el motor de *pitch*, y terminando toda la estructura que mueve el motor de *roll*, la cual contiene a la primera. En un diseño final calculando bien el peso de todos los componentes se podría eliminar la necesidad de añadir peso para este equilibrado, pero como se trabajaba sobre un modelo existente se tuvo que recurrir al uso de plomo para este fin.

Al estar la estructura montada entre rodamientos en sus partes móviles, y al no ofrecer apenas resistencia a la rotación los motores cuando no se les aplica corriente, para centrarlo únicamente se añade plomo hasta que la estructura no tenga tendencia a asentarse en ninguna posición concreta, añadiendo plomo en el lado opuesto al que tenga tendencia a asentarse, hasta que ésta desaparezca por completo.



Figura 31. Detalle de los lugares plomados para equilibrar la *gimbal*.

Primero se presentó el plomo usando un poco de pegamento termofusible, debido a su facilidad de aplicación y a la rapidez del secado. Una vez conforme con la cantidad de plomo añadido, comprobando que el eje está equilibrado correctamente, se aplicó resina epoxy con microbalones para fijar el plomo definitivamente en su lugar. Los microbalones son microesferas de vidrio huecas, es un aditivo que se usa mezclándolo con la resina epoxy aumentando su espesor conforme se aumenta la proporción de microbalones-epoxy, y al ser microesferas huecas, aumentan el volumen de la resina epoxy reduciendo su densidad, lo cual es estupendo puesto que de pesar demasiado afectaría al centrado previo.

En la figura 31 se puede apreciar los lugares en los que hizo falta la adición de plomo para el centrado. En dicha figura también se puede apreciar el emplazamiento elegido para la IMU.

La IMU tiene marcados sobre su propia placa la dirección de sus ejes coordenados, los cuales son paralelos con sus lados. Si bien la orientación de la imu no es un punto crítico, si es importante colocarla de tal modo que sus lados queden paralelos con los ejes de rotación de la *gimbal*. De este modo, aunque sus ejes no coincidan con los de rotación de la *gimbal* se puede traducir posteriormente este cambio de referencia mediante software. Sin embargo, si los ejes coordenados de la imu no estuviesen perfectamente alineados con los ejes de giro de la *gimbal*, daría lugar a lecturas en la actitud de la imu que no corresponderían con la actitud real de la cámara, por ello esta parte es importante.

Una vez centrada la *gimbal* y colocada la electrónica en su sitio, ya esta preparada para funcionar. En la figura 32 se puede observar como quedó finalmente, a falta de las carcasas que cubren el conjunto.



Figura 32. Vista de la carga de pago con la electrónica montada.



En el primer vuelo advertimos que la carcasa externa que conforma la carga de pago era demasiado flexible para basar la estabilización en una IMU sostenida por dicha carcasa, que como ya se ha comentado es relativamente sensible a las vibraciones. La resistencia longitudinal es excelente en esta carga de pago, al igual que en la versión antigua, puesto que es la resistencia que se pone a prueba en cada aterrizaje cuando el UAV impacta prácticamente sobre el morro. Sin embargo, la resistencia a torsión de la carga de pago era mucho menor, y se podía observar a simple vista que con la mano se podía retorcer la carcasa y observar la deformación.

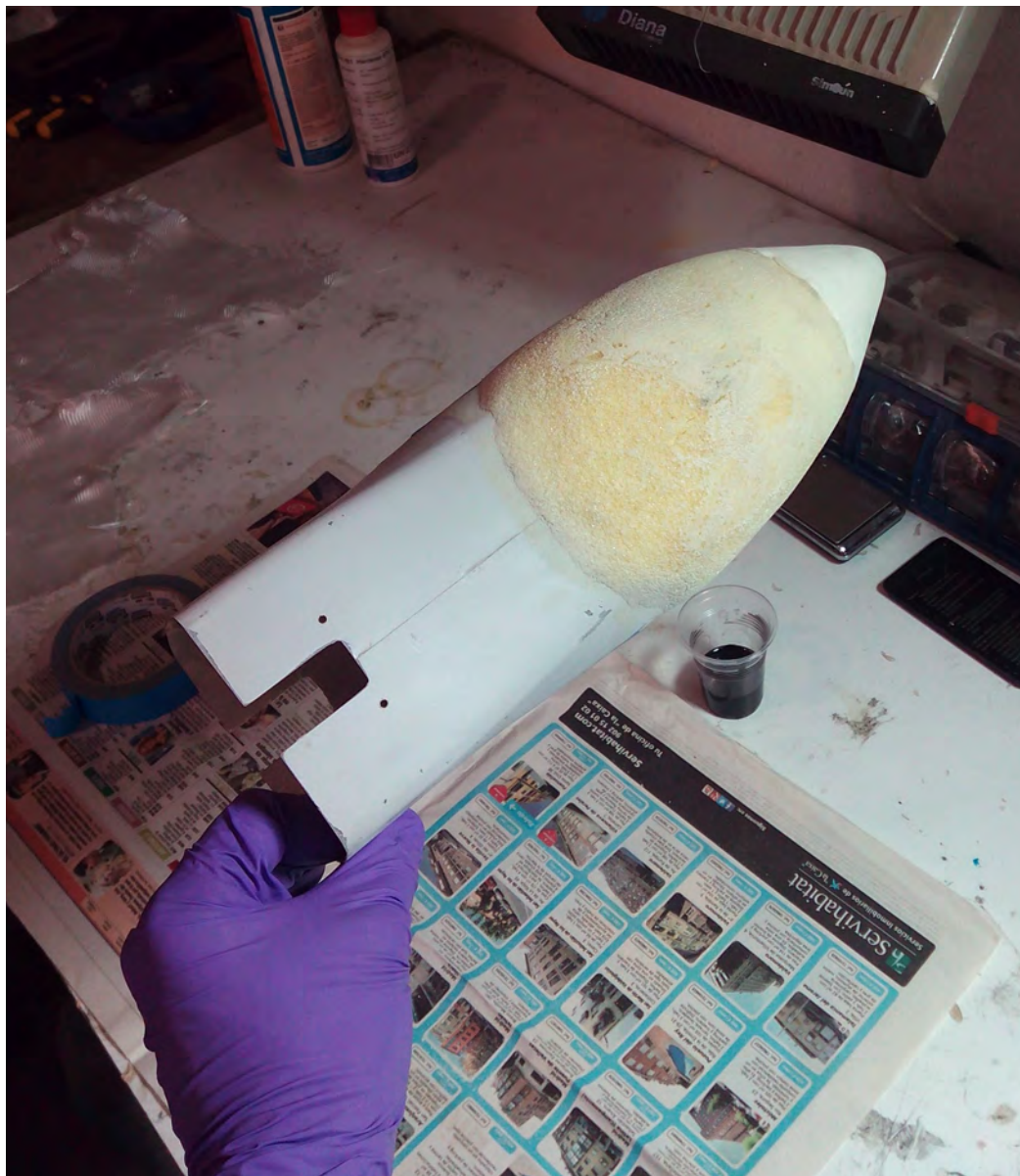


Figura 33. Vista de la carcasa desde arriba donde se puede apreciar el poliuretano y el poliestireno expandido añadido, tras darles forma.



Además, como se ha mencionado antes, la tolerancia entre la carcasa esférica que cubre la *gimbal* y la carcasa externa es muy ajustada, y en cuanto se cuele una mínima cantidad de suciedad afecta a la suavidad con la que se mueven las partes móviles del conjunto.

Hay que recordar que este sistema está pensado para funcionar completamente equilibrado y además con unas articulaciones que funcionen de forma suave. Los motores están pensados únicamente para ejercer el torque necesario para mover la inercia de la masa en cuestión, la resistencia adicional debida a esta suciedad no estaba contemplada a la hora de elegir los motores.

Por estos motivos se decidió modificar la geometría de la carcasa de la carga de pago, aumentando su volumen en la zona donde estaba más cerca de la carcasa esférica y por tanto corría más riesgo de entorpecer el movimiento del conjunto.

Aprovechando también que se necesitaba reforzar en general la carcasa de la carga de pago por el problema de flexibilidad excesiva de la misma, se optó por hacer una carcasa completamente nueva a partir de una existente, usando materiales compuestos y la técnica de molde perdido con poliestireno expandido y con resina de poliuretano.

En primer lugar, se tomó la carcasa de la carga de pago a modificar, y en las zonas que se deseaba aumentar su volumen se aplicó resina de poliuretano de dos componentes con agente espumante. Al hacer la mezcla de esta resina con agente espumante aumenta su volumen 10 veces sobre el volumen inicial. De este modo, aplicándolo sobre las zonas que se deseaba agrandar, una vez curado se tenía una buena base para continuar lijando hasta obtener la forma final deseada. En la figura 33 se puede observar la resina de poliuretano una vez lijada (parte amarillenta) y la parte de poliestireno expandido (parte clara) que se explicará a continuación.

La resina de poliuretano es un recurso muy útil cuando se requiere dar una nueva forma a una superficie ya existente como en este caso, que se quiere aumentar el volumen sobre una carcasa que ya se tenía. Sin embargo es complicada de lijar comparada con otros materiales similares.

Siempre que sea posible es conveniente usar poliestireno expandido. Este material se vende en forma de plantas de tamaños y espesor muy variados, es mucho más sencillo de lijar, y el acabado final de la superficie tras lijarlo es increíblemente mejor que el del poliuretano, lo cual se va a agradecer mucho en el siguiente paso, cuando se aplique el material compuesto. También tiene otra ventaja importante para esta aplicación frente al poliuretano y es que se disuelve al aplicarle acetona.

En la punta de la carga de pago se pudo usar directamente poliestireno expandido puesto que no se necesitaba hacerla a partir de ninguna superficie existente. Se tomó un taco con forma de cubo de este material, se pegó en el resto de la carcasa más o menos donde hacia falta colocar la punta, y se le dió forma poco a poco con ayuda de cuchillos largos y lija. En las figura 34 se puede observar como quedó todo el conjunto una vez lijado.



*Figura 34. Vista lateral donde se puede apreciar el ajuste de la parte inferior a la carcasa esférica.*

El siguiente paso a realizar es aplicar la resina epoxy con fibra de vidrio a la falsa superficie que se ha creado con el poliuretano y el poliestireno expandido. Antes de llevar a cabo esta acción, se debe enmascarar con cinta desmoldeante el borde de la carcasa que engancha con la tapadera que cubre la electrónica que se va a aprovechar de la versión antigua, para que no se pegue ningún residuo de epoxy y dejen de encajar las dos piezas correctamente. En la figura 35 se puede observar donde se ha enmascarado con cinta desmoldeante azul, y también se puede apreciar el abultamiento que se ha dejado en la parte inferior del morro de la carga de pago para alojar el motor de *roll*.



Figura 35. Detalle del volumen de la carcasa para albergar el motor de *roll*



En la figura 36 se puede observar la parte inferior de la carga de pago tras aplicar varias capas de fibra de vidrio con resina epoxy. Tanto la fibra de vidrio como la resina epoxy suelen tener un color claro, casi transparente, pero se ha mezclado con un tinte de color negro para que se pueda apreciar donde y como se ha aplicado. El siguiente paso una vez que se ha conformado la nueva carcasa externa es deshacerse de la carcasa vieja, que aún sigue presente debajo del poliuretano. Para ello, se harán sucesivas “ventanas” con una herramienta tipo dremel con un disco diamantado y se irán retirando hasta eliminar por completo la parte de la carcasa vieja que ya no es de utilidad.



Figura 36. Detalle de la aplicación de fibra de vidrio en la parte inferior de la carcasa.

En la figura 37 se puede observar como al retirar la “ventana” de la carcasa antigua se queda la nueva carcasa conformada, conservando aún el núcleo de poliuretano que se retirará mas adelante.



Figura 37. Detalle de la eliminación de la carcasa vieja por partes.





Figura 38. Detalle de la eliminación completa de la carcasa antigua que ya no es de utilidad.

Finalmente, en la figura 38 se puede observar como queda el interior de la carcasa de la carga de pago tras retirar ambas ventanas.

Hay que recordar que además de reforzar todo el conjunto, la finalidad de todo este proceso era agrandar la cavidad interna de la carcasa de la carga de pago. Según la figura 38 el volumen interno sigue siendo el mismo, por lo tanto se debe eliminar el poliuretano para aprovechar el espacio interior ganado con este proceso. Se hará del mismo modo con el poliestireno expandido de la punta, de una forma mucho más sencilla ya que con vertir un poco de acetona se disolverá por completo.

En la figura 38 se observa que todavía está presente, sujeta por el morro de poliestireno expandido, la sección que en la carcasa antigua soportaba el motor de *roll*. Aprovechando que está colocada en un lugar correcto, y con una orientación perfecta, se reutilizará como soporte para el motor de *roll* en la nueva versión.

No obstante, para ello habrá que unirla a la nueva carcasa, por lo tanto tras eliminar el poliuretano , con una masilla hecha a base de resina epoxy y microbalones se fija esta sección a la carcasa de forma permanente. Del mismo modo, se va a prolongar ligeramente la carcasa por la parte inferior, para que ajuste correctamente con la carcasa esférica que cubre la *gimbal*. Ambos pasos se han hecho usando resina con tinte de color azul, para apreciar la parte que se ha añadido y la parte que ya aplicó en el anterior paso.



Figura 39. Detalle de como ha quedado el interior de la nueva carcasa tras eliminar el poliuretano que le dió forma durante la aplicación de fibra de vidrio.





Figura 40. En esta imagen se puede observar donde se ha aplicado la masilla para sujetar la sección que soportará el motor de *roll*, así como la fibra de vidrio adicional para ajustar correctamente con la carcasa esférica de la *gimbal*.

En la figura 40 se puede apreciar como se ha aplicado la masilla de epoxy y microbalones para fijar la sección a la nueva carcasa, y como se ha aplicado un poco más de fibra de vidrio para que la carcasa esférica que cubre el conjunto quedase más ajustada.





Figura 41. Detalle de la cinta desmoldeante aplicada a modo de “molde” para los laterales de la carcasa durante el curado del material aplicado.

Como esta es la última capa de fibra de vidrio que se necesitará, se ha optado por laminarla con la tapa de la electrónica puesta, habiéndola aplicado desmoldeante previamente, para que todo el conjunto ajuste a la perfección una vez acabado. Del mismo modo, se ha colocado cinta desmoldeante a los lados de la carcasa, haciendo de “molde” para que la nueva fibra aplicada se quede con esa forma y cierre de forma correcta la carcasa, como se puede observar en la figura 41.



Figura 42. Detalle de la marca previa a la eliminación de la fibra sobrante.

Una vez curada la resina epoxy de la última aplicación, se marca el contorno por donde pasará la carcasa esférica, para posteriormente cortarlo con la herramienta tipo dremel, y dejar el borde de la carcasa perfectamente ajustado con la carcasa esférica. En la figura 42 se puede observar la zona marcada, y como quedó la última aplicación de material compuesto en el conjunto. Las partes azul más claro corresponden a masilla con microbalones, que se ha aplicado en los bordes, para darles más grosor y evitar cortarse al manipular la carcasa para montar la electrónica, ya que la capa de fibra de vidrio es muy fina, apenas medio milímetro.

Tras cortar la fibra de vidrio sobrante y comprobar que la cubierta esférica entra correctamente, se le aplica una capa de masilla de poliester a toda la superficie externa que tiene irregularidades como consecuencia de la aplicación sucesiva de fibra de vidrio y masilla epoxy. Esta masilla de poliester es usada por carroceros para reparar abolladuras e imperfecciones en coches, se aplica muy cómodamente con una espátula, es muy sencilla de lijar, y el acabado final tras lijarla es excelente. En la figura 43 se puede apreciar como se ha aplicado masilla de poliester a la superficie externa, con el sobrante de fibra de vidrio ya ajustado.



Figura 43. Vista lateral de la carcasa tras aplicar masilla de poliester, antes del lijado.



En la figura 44 se puede apreciar cómo se han aplicado las diferentes capas de fibra de vidrio gracias a la pigmentación negra aplicada a la resina. Como se puede apreciar, sólo se han aplicado varias capas en la parte que conforma la nueva carcasa. La parte más transparente que corresponde a menos capas de fibra de vidrio tiene como función sujetar la parte de fibra nueva a la antigua, por lo tanto no es necesario que tenga tanta resistencia mecánica, por que ya tiene un buen grosor de la carcasa antigua. La parte eliminada de la carcasa antigua está más o menos a la altura a la que se ha aplicado la masilla de poliéster, por lo tanto la fibra de vidrio “solapa” sobre la carcasa vieja aproximadamente 10 cm. El conjunto quedó muy robusto, y no torsionaba en absoluto.



Figura 44. Detalle de las diferentes capas de fibra de vidrio aplicadas.

Tras lijar la masilla de poliester hasta obtener una superficie libre de imperfecciones, el último paso antes de pintar la carcasa es hacer una pequeña tapa en la punta para poder acceder al emplazamiento del motor de *roll*. Con la herramienta tipo dremel se cortó el contorno de una tapa lo suficientemente grande como para montar con comodidad el motor, y se dispuso a ajustar bien el cierre de la tapa, ya que al cortarla con el disco diamantado, un pequeño porcentaje del contorno de la pieza cortada se elimina, y ya no



Figura 45. Detalle del proceso de conformación del ajuste entre la tapa del motor de *roll* y la carcasa.

encaja a la perfección. Para hacer este contorno del cierre de la tapa correctamente, se aplica desmoldeante a la tapa para que no se adhiera nada de resina epoxy, se presenta con cinta adhesiva en el lugar deseado y se aplica epoxy con microbalones en la ranura que queda entre la tapa y su emplazamiento. En la figura 45 se puede observar este proceso, con la masilla de poliester completamente aparejada a la carcasa.

De este modo cuando la masilla de epoxy y microbalones cure por completo, al tener la tapa desmoldeante aplicado se podrá retirar sin problema, quedando la “cama” de epoxy y microbalones adherida a la carcasa, y por lo tanto, proporcionando un cierre perfecto entre ambas piezas. Únicamente se debe lijar un poco el exceso de epoxy aplicado y ya estaría lista para pintar. En la figura 46 se puede observar la carcasa ya pintada, durante el proceso de implementación de la misma en el UAV.



Figura 46. Prototipo ya pintado y montado en el UAV durante el proceso de implementación.

A continuación se presenta un esquema con las partes de la carga de pago y las modificaciones hechas sobre cada una de ellas.

Carcasa exterior	-Se ha reconstruido la geometría de esta carcasa prácticamente por completo, y también se ha reforzado usando materiales compuestos.
Mecánica de la <i>gimbal</i>	-Se ha aprovechado la vieja mecánica modificándola para albergar los nuevos actuadores, los motores.
Electrónica de control	-Se ha prescindido por completo de la electrónica de la carga de pago previa, y se ha colocado una electrónica completamente nueva, por una parte la etapa de control de motores explicada en fundamentos teóricos y por otra parte una placa de desarrollo con una arquitectura basada en un microchip de 32 bits, dedicada al control y a la comunicación con el autopiloto.
Actuadores	-Se han sustituido los servos y engranajes previos por motores BLDC con transmisión directa entre las partes móviles de la <i>gimbal</i> .
Cámara de video	-Se han conservado las mismas cámaras de vídeo que en la versión anterior, puesto que son de una calidad excelente, de las mejores en esta categoría.
Software de control	-Se ha escrito un código apropiado para el control de esta carga de pago, basado en los fundamentos teóricos explicados en esta memoria.



### 6.1.2-Versión en dos ejes: Resultados obtenidos y posibles mejoras

A la hora de probar esta versión se situó el punto de equilibrio con *roll* a 90 grados, es decir, mirando completamente hacia un lado, y “*pitch*” perpendicular al eje longitudinal de *roll*, para que la cámara apuntase por completo hacia un lado. Se ha puesto *pitch* entre comillas por que tal y como se ha presentado la esta versión de la carga durante el desarrollo, el motor que movía el eje transversal correspondía con el movimiento de *pitch*, pero conforme el eje de *roll* se mueve hacia los lados, al contener éste al resto del conjunto, el eje de *pitch* se inclina, y en el caso del punto de equilibrio elegido, con el eje de *roll* a 90 grados, el eje que antes era *pitch* se ha inclinado 90 grados, por lo tanto ha dejado de corresponder con el movimiento de *pitch* para corresponder con el movimiento de *yaw*. Más adelante se comentarán los inconvenientes de esto.

La primera impresión fue estupenda. La estabilización era increíblemente mejor que la versión anterior. Trabajando en el punto de equilibrio elegido, el error instantáneo en ningún momento superaba 1 grado, lo cual solo ocurría cuando se le forzaba con movimientos intencionados en tierra, en vuelo el error era mucho menor, del orden de unos pocos minutos.

Sin embargo, cuando se desplazó la cámara de su punto de equilibrio empezaron los problemas. En dicha posición, con el eje de *roll* fijo a 90 grados, se podía girar el motor de *pitch* ( que ahora correspondía al eje de *yaw* ), sin ningún problema, respondiendo el sistema de forma correcta pudiendo mirar hacia los lados del UAV, pero la altura a la que apunta la cámara quedaba determinada por el eje de *roll*. De este modo, cuando se movía el motor de *roll* para variar la altura a la que se deseaba apuntar comenzaron los problemas. Al variar la posición del eje de *roll*, como éste contiene al resto de la *gimbal* en esta configuración, cambiaba la orientación en el espacio del eje de *yaw*, de tal modo que cuanto más se inclina el eje de *roll*, más se acerca el eje de *yaw* al eje de *pitch*. En un principio no se contempló esto en el software, y el controlador de la *gimbal* al querer estabilizar en el eje *yaw*, y responder dicho motor con una mezcla de movimiento en *yaw* y *pitch*, debido a la inclinación de dicho eje, el sistema perdía por completo la linealidad comentada en el apartado de control, perdiendo por completo el control sobre la cámara.

Volviendo a mirar la parte de control, se advirtió que solucionar este inconveniente sería una tarea relativamente compleja. El movimiento de *roll* estaba bien tal y como estaba, pero el movimiento de *pitch-yaw*, necesitaba de una remodelación completa. Cuando el eje de *roll* estaba apuntando completamente horizontal, o desfasado 90 grados, es decir, vertical, no habría ningún problema tal y como se había comprobado. En estas



situaciones, el otro motor estaba alineado con el eje de *pitch* en el caso de estar *roll* horizontal, y si el *roll* estaba a 90 grados, dicho motor coincidía perfectamente con el eje de *yaw*. El problema es que en todos los puntos intermedios, dicho motor correspondería a una mezcla de movimiento de *pitch* y *yaw*, y habría que establecer en el software de control en cada uno de esos puntos intermedios que cantidad de movimiento correspondería a cada eje. Esta es una tarea sencilla de plantear, pero iba a llevar algo más de tiempo llevarla a cabo.

También el inconveniente de que la imagen cambiaba de orientación al apuntar hacia los lados seguía presente, haciendo complicado situar la imagen en el espacio para los operadores.

Llegado este punto se propusieron varios caminos a tomar. Por una parte, se podría invertir tiempo en solucionar el software de control, aunque la carga de pago seguiría teniendo algunas carencias, como el problema de la orientación de la imagen como consecuencia de la ausencia del tercer eje. Por otra parte se barajó la posibilidad de probar el sistema en tres ejes directamente. Se solucionaría el problema de la orientación de la imagen, y colocando los ejes de la manera adecuada el software de control sería mucho más sencillo y más efectivo.

Finalmente se decidió la segunda opción, puesto que el tiempo que se estimó que se tardaría en arreglar el software de control y probarlo, con la penalización de que todavía quedarían algunos problemas presentes no merecía la pena invertirlo en esta tarea pudiendo dedicar ese tiempo a desarrollar una versión completamente nueva, que podría solucionar todos los problemas presentes y proporcionar una calidad de imagen superior.

De este modo, este prototipo de carga de pago fue solo un paso intermedio para llegar a la versión final. No obstante, cumplió su función a la perfección, demostrando que el sistema era viable, aunque solo estabilizase de forma correcta en los puntos de equilibrio citados previamente. Esta demostración de viabilidad es un paso intermedio muy importante en empresas grandes como Indra Systems, en las que todos los medios invertidos en investigación tienen que estar perfectamente justificados, y más aún en un sistema como el UAV Mantis que era un producto perfectamente acabado y funcional.

### 6.2.1- Versión en 3 ejes: Proceso de construcción

Se eligió el orden de los ángulos de Euler *pitch-roll-yaw*, siendo *pitch* el último de la jerarquía, el que mueve únicamente la cámara, y siendo *yaw* el primero, conteniendo toda la estructura de la *gimbal*.

Recordando del apartado de fundamentos teóricos de ángulos de Euler, para evitar que ocurriese *gimbal lock* en una *gimbal* de tres ejes se debía apuntar la cámara únicamente moviendo el primer y último eje de la jerarquía, dejando el del medio sin perturbar. De este modo se conserva la ortogonalidad entre los tres ejes y por consiguiente la linealidad del sistema, aunque como se verá más adelante esto no es cierto en todas las situaciones cuando se trata de una *gimbal* montada en un UAV de ala fija.

Además de evitar *gimbal lock*, esta configuración permite un apuntamiento virtual de 360 grados en el eje de *yaw*, hacia los lados, y un apuntamiento de desde -90 hasta 45 grados en *pitch*, es decir desde apuntando completamente hacia abajo hasta 45 grados con respecto a la horizontal. La limitación en el apuntamiento hacia arriba es debida al emplazamiento del motor de *yaw*, justo encima de la *gimbal*. No obstante, en un UAV de reconocimiento no es de interés en absoluto que la cámara pueda apuntar por encima de dichos límites, por que la zona de interés siempre va a estar por debajo del UAV.

Teniendo claras las bases de diseño de este prototipo, se comenzó la construcción del modelo. Se aprovechó la carcasa construida de la versión de dos ejes, y se acomodó a la nueva configuración.

Toda la mecánica de la *gimbal* anterior no serviría para una configuración en tres ejes. De este modo se optó por colocar el motor de *yaw*, el más alto en la jerarquía y el cual moverá el resto de la *gimbal* en el “techo” de la carcasa, quedando el resto de la estructura colgada de éste.

La mecánica de esta *gimbal* se hizo a partir de escuadras de fibra de carbono. Para su construcción simplemente se cortaron las piezas a medida de una plancha de carbono, ya con la forma final, con los agujeros por donde se enrutarían los cables y los correspondientes a las sujeciones de los motores.

Como al añadir un eje más el volumen del conjunto aumentó considerablemente, mantener el tamaño total lo más reducido dentro de lo posible primó sobre intentar construir el conjunto equilibrado sin plomo. De este modo, se hicieron todas las escuadras

para que el conjunto quedase lo más simétrico posible respecto al eje de *yaw*, que es sobre el que giraría toda la *gimbal*. Si no estuviese centrado con respecto a este eje, ocuparía un volumen desigual conforme cambiase la orientación en dicho eje. Aún así, hubo que volver a hacer algunas modificaciones en la carcasa para albergar un volumen mayor para el que estaba preparada.

Una vez cortadas las piezas que conforman las escuadras se presentaron con cianocrilato, pegándolas a 90 grados minuciosamente, puesto que de esta ortogonalidad dependería el buen funcionamiento del conjunto. Una vez asegurado que las escuadras tenían la geometría perfecta, se procedió a reforzar la unión que sólo estaba sujeta por cianocrilato.

Para reforzar esta unión se aplicó masilla a base de resina epoxy y microbalones justo en la esquina de la escuadra, y encima de esta masilla se aplicaron unas mechas de carbono para dar resistencia a tracción, ya que la masilla por si sola sólo es buena a compresión. Encima de las mechas de carbono se aplicó una fina capa de fibra de vidrio, para adherir bien las mechas de carbono en su sitio. De este modo quedaría un “sandwich” de fibra de carbono con relleno de epoxy y microbalones. En la figura 47 se pueden observar las escuadras finalizadas.



Figura 47. Detalle de la construcción de las escuadras que conformarán la estructura de la *gimbal*.

Tras finalizar la construcción de las escuadras se procedió a presentar todo el conjunto dentro de la carcasa. Antes de poder llevar a cabo esta acción se advirtió que el hueco disponible en la carcasa era demasiado pequeño para albergar esta nueva estructura, por lo que previamente se cortaron un poco los bordes de la misma para poder presentar bien la *gimbal*. En la figura 48 se puede apreciar la carcasa ya cortada y la estructura de la *gimbal* presentada en su lugar.



Figura 48. Estructura de la *gimbal* presentada en su lugar final.

Habiendo asegurado que el conjunto encaja correctamente, el siguiente paso es plantear como se va a cerrar la carcasa de la carga de pago. Aunque es sólo un prototipo de prueba tiene que ir completamente tapado puesto que la resistencia aerodinámica inducida en la

*gimbal* durante el vuelo del UAV sería lo suficientemente fuerte como para perturbar el buen funcionamiento de la *gimbal*.

De este modo, midiendo las dimensiones de los límites que ocupa la estructura de la *gimbal* y posteriormente dándole forma a poliestireno expandido se presentó la forma final de la carga de pago, como se puede observar en la figura 49.



Figura 49. Parte inferior de la carcasa conformada en poliestireno expandido y presentada antes de aplicar la fibra de vidrio.

La cúpula que se observa procede de la cubierta de una cámara de seguridad, y sería la que cubriría toda la *gimbal*. Hubo algunas dudas sobre como colocar esta cúpula. Era media esfera, por lo tanto podría cubrir la mitad de la *gimbal*, lo que quiere decir que la mitad superior estaría cubierta por la carcasa opaca de la carga de pago. La mayoría de las veces no es necesario apuntar por encima de este límite, pero cuando se vuela en círculos sobre un objetivo, juntando el apuntamiento hacia un lado con la inclinación del UAV para seguir el trazado de la trayectoria circular, es posible que la cámara estuviese justo en el límite entre carcasa y cúpula transparente.



Por este motivo, se decidió sacrificar el apuntamiento hacia uno de los lados de la carga de pago, para favorecer el apuntamiento en la situación descrita en el lado opuesto. De este modo se colocaría la cúpula ligeramente inclinada hacia el lado elegido, como se puede observar en la figura 50.



Figura 50. Detalle de la inclinación de la cúpula que cubrirá la *gimbal*.

Así se podría conservar el apuntamiento en todas las situaciones del vuelo excepto volando en círculos hacia la derecha. Como es una versión de prueba, se puede probar la funcionalidad del conjunto volando en círculos hacia la izquierda en el caso de un objetivo fijo. En la versión final cabría la posibilidad de hacer una cúpula a medida con la geometría adecuada para permitir apuntamiento hacia cualquier lado, pero al ser esta una versión de prueba había que usar las piezas que se tenían a mano para probarla cuanto antes y poder seguir avanzando en el proyecto.

El siguiente paso es cubrir con fibra de vidrio el poliestireno expandido, aplicar resina de poliéster para aparejar la superficie, y ajustar la parte de fibra de vidrio nueva a la cúpula semiesférica, del mismo modo que se hizo en el apartado anterior. En la figura 51 se puede observar el conjunto final presentado, justo antes de comenzar a aplicar fibra de vidrio.



Figura 51. Parte inferior de la carcasa en poliestireno expandido presentada junto a la cúpula transparente.

Tras aparejar la superficie después de aplicar la fibra de vidrio se montó toda la estructura de la *gimbal* y la electrónica del conjunto. Se decidió no pintar el exterior por que hubo problemas para encontrar cúpulas transparentes iguales a la mostrada, por lo tanto era posible que hubiese que modificar ligeramente la carcasa para albergar una nueva cúpula. En la figura 52 se puede observar el prototipo totalmente acabado, listo para las pruebas.



Figura 52. Prototipo de tres ejes completamente acabado y montado, listo para funcionar.



A continuación se presenta un esquema de las modificaciones realizadas en esta versión frente al prototipo anterior.

Carcasa exterior	-Se ha partido de la carcasa construida en el prototipo anterior, y se ha reconstruido toda la parte inferior para poder colocar una cúpula transparente que proteja apropiadamente la nueva mecánica de tres ejes.
Mecánica de la <i>gimbal</i>	-Se ha construido una estructura nueva de tres ejes, a partir de escuadras hechas en fibra de carbono.
Electrónica de control	-Se ha adaptado la parte de control de los motores para añadir una nueva etapa para el motor extra del tercer eje. En cuanto a la placa de desarrollo se ha conservado la del prototipo anterior.
Actuadores	-Se ha añadido un motor más para el tercer eje, Siendo ligeramente más grande y potente, puesto que al tener un eje más, el conjunto es más pesado y tiene más inercia que tendrá que ser movida por este nuevo motor de <i>yaw</i> .
Cámara de video	-Se han conservado ambas cámaras de video.
Software de control	-Se ha reescrito la parte de control del software para adaptarlo al control de 3 ejes. También se ha depurado el código en general, y se han añadido nuevas funcionalidades.

### 6.2.2- Versión en tres ejes: Resultados obtenidos y posibles mejoras

Tras probar en vuelo este nuevo prototipo pronto se advirtió de la superioridad de un sistema de 3 ejes con respecto a uno de 2 ejes. La calidad de estabilización es perfecta, por mucho que el UAV se mueva la imagen permanece completamente estabilizada.

Además, al usar sólo el primer y tercer eje, *yaw* y *pitch*, para apuntar, el conjunto siempre tiene los 3 ejes ortogonales entre sí, por lo tanto no es tan exigente para el software de control. Sólo pierde linealidad cuando la cámara está mirando hacia delante y el avión se mueve en el eje de *roll* más de 50 grados, es cuando el eje de *yaw* se empieza a acercar al de *pitch*. Esto nunca ocurre en una situación de vuelo real por que el autopiloto del UAV limita los virajes a 35 grados de *roll*.

Se tuvo algunos problemas derivados del elevado volumen de cables que se debieron enrutar a través de cada articulación. Finalmente y tras muchas formas diferentes de enrutarlos se consiguió dejarlos de tal modo que no ofreciesen resistencia significativa al movimiento de la *gimbal*. No obstante, esto se hizo a expensas de reducir el movimiento útil de la *gimbal*. Se dejó una libertad en el eje de *roll* poco mayor que los 35 grados máximos que demandaría el autopiloto, y con el eje de *yaw* también se tuvo que eliminar una zona útil, puesto que los cables iban “enrollados” en dicho motor y cuando se acercaba a un giro completo de 360 grados los cables estaban demasiado enrollados y ofrecían demasiada resistencia como para permitir un funcionamiento fluido de la *gimbal*.

Salvando estos pequeños inconvenientes, el prototipo fue todo un éxito, y finalmente quedó verificado que esta tecnología era superior al uso de servos para estabilización de imagen.

## 7- MODELO FINAL

Tras comprobar la estupenda funcionalidad del prototipo se comenzó el diseño de la versión definitiva. Este diseño está basado en el último prototipo construido, pero completamente personalizado para este UAV. Se hicieron moldes específicos a partir de un modelo previamente modelado por software 3D para la carcasa exterior, Al igual que para la estructura de la *gimbal*, y las piezas complementarias se hicieron en plástico de alta calidad. La cúpula transparente se hizo también a medida para permitir un movimiento completo alrededor del eje de *yaw*.

En este modelo final se solucionaron los problemas derivados de la resistencia mecánica de los cables. Al estar todo el conjunto previamente modelado en 3D se pudo plantear el lugar de todos los componentes para poder enrutar los cables de tal modo que se opusiesen lo mínimo al movimiento de la *gimbal*.

Una de las claves para conseguir este enrutado con tan poca resistencia al movimiento fue usar el diámetro de cable estrictamente indispensable para la corriente necesitada, por lo que todos los cables excepto los de alimentación se pudieron usar de un diámetro mucho mas pequeño, y por tanto ofreciendo menos resistencia al movimiento.

Otro punto importante en el diseño de este último modelo fue el diseño de motores de gran diámetro y muy poco espesor, para compactar al máximo el volumen de la *gimbal*. De éste modo también se les dotó de un eje hueco con un diámetro interior lo suficientemente grande como para enrutar los cables a través de él. De este modo, al pasar los cables a través de la articulación exactamente por el eje de giro de la misma, el “enrollamiento” es mínimo, al igual que la resistencia al movimiento ofrecida.

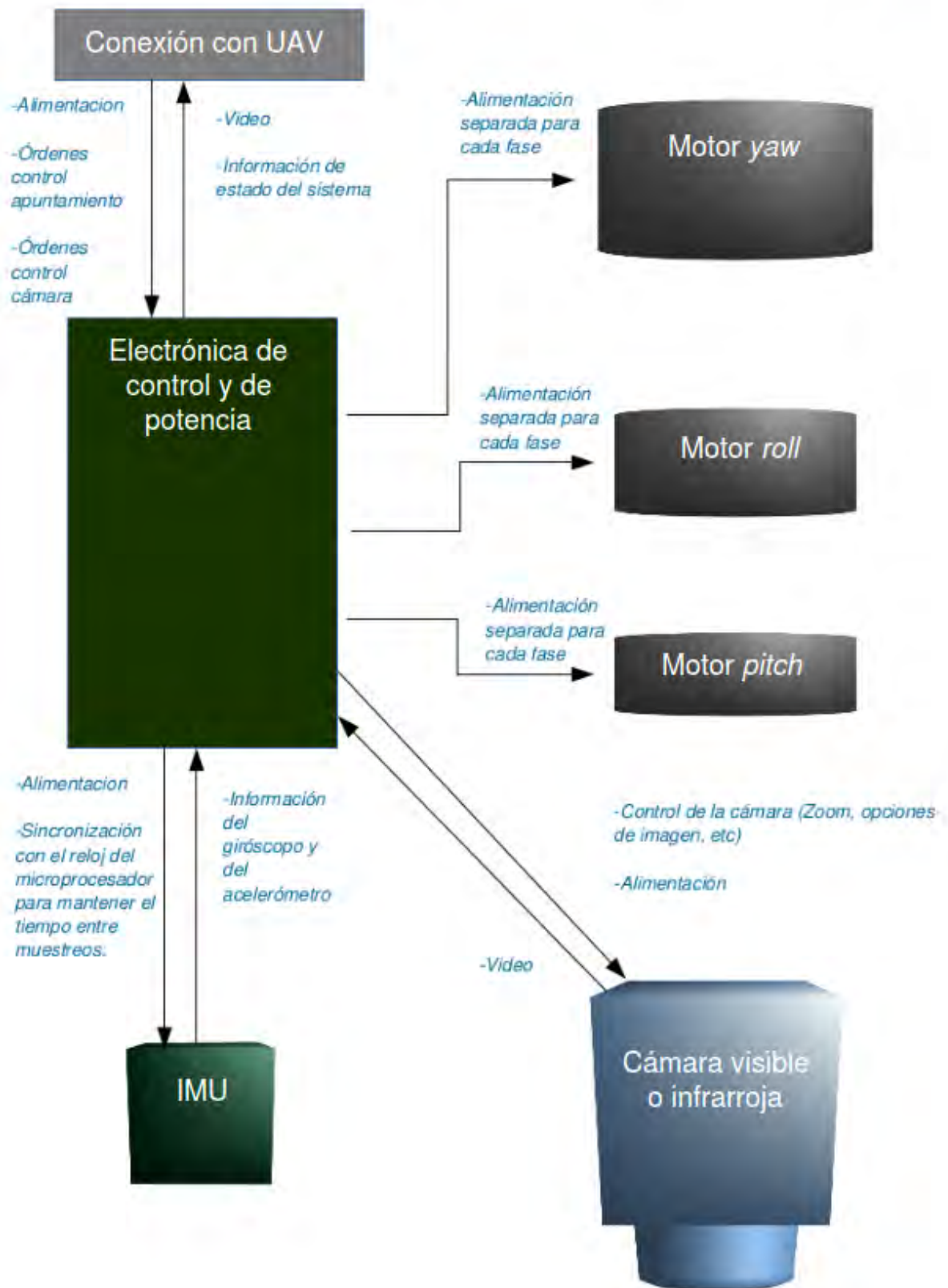
A su vez también se depuró mucho la parte de software de control. Entre otras mejoras, se programaron diferentes valores de PID para ciertas orientaciones de la *gimbal* en las que la linealidad era ligeramente diferente a la óptima para punto de equilibrio inicial. De este modo, se caracterizó el sistema en todas las orientaciones de trabajo posibles, y ajustando unos valores de PID para cada orientación “comprometida” en la que los PID iniciales no funcionaban correctamente se consiguió que la estabilización fuese perfecta en cualquier situación. Estas pequeñas diferencias en las características dinámicas del sistema seguramente se debían a los motivos mencionados durante la memoria, un equilibrado imperfecto o una resistencia desigual de los cables en diferentes orientaciones.

Esta versión nueva de carga de pago aunque ya es plenamente funcional aún se considera en fase de desarrollo. Un UAV para uso militar tiene que pasar rigurosos controles de calidad, y hasta que no se está completamente seguro de que el producto cumple los requerimientos en cualquier entorno y ante cualquier situación no se puede considerar un producto acabado para añadir al catálogo de UAV de la empresa.

Por este motivo no es posible incluir en esta memoria más información técnica acerca de la versión final de la carga de pago, así como fotos de la geometría final del conjunto. No obstante, en la figura 53 se puede apreciar un esquema orientativo de los principales componentes.

A continuación se presenta un resumen de las variaciones de la versión final con respecto al último prototipo.

Carcasa exterior	-Completamente rediseñada en software de modelado 3D, y fabricada en materiales compuestos a partir de moldes fresados a partir del modelo creado en 3D.
Mecánica de la <i>gimbal</i>	-Rediseñada por completo para contener al máximo su volumen, y prescindir del uso de plomo para su equilibrado. Fabricada en materiales compuestos y plástico de alta calidad impreso en 3D por láser.
Electrónica de control	-Completamente rediseñada a la medida de la carga de pago, unificando la etapa de control de los motores y la etapa del microprocesador en una sola placa de electrónica, reduciendo mucho el volumen del conjunto.
Actuadores	-Se han diseñado y fabricado motores a medida para este modelo final. Se han fabricado con mucho más diámetro y menos ancho, para maximizar el torque proporcionado y mantener el conjunto lo más compacto posible, y con un eje hueco para enrutar los cables a través de ellos.
Cámara de video	-Se han sustituido por cámaras de similares prestaciones pero con tecnología actual, más ligeras y compactas.
Software de control	-Se ha depurado mucho el código del último prototipo y se ha implementado por completo en el conjunto del UAV.



-Figura 53. Esquema orientativo de los principales componentes y conexiones de la carga de pago final

## 8- CONCLUSIONES

Tras los resultados obtenidos con esta nueva tecnología para estabilización de imagen no cabe duda de que es el camino que van a tomar todas las soluciones comerciales de cargas de pago para UAV de reconocimiento de tamaño reducido como el Mantis.

Recapitulando lo visto durante esta memoria, los puntos más importantes a tener en cuenta al desarrollar un sistema de estabilización basado en *gimbal brushless* para un UAV serían los siguientes:

- Es necesario usar tres ejes mecánicos en la *gimbal*: Aunque en un sistema menos exigente dinámicamente pueda ser suficiente con un sistema en dos ejes, en un UAV tan pequeño son necesarios tres ejes para tener una estabilización perfecta en cualquier situación, y tener una libertad de apuntamiento razonable.

- La jerarquía de los ejes de la *gimbal* es importante: Para obtener una libertad de apuntamiento buena sin que ocurra *gimbal lock* es necesario que para apuntar se usen estrictamente el primer y último eje de la jerarquía. El orden de los mismos es indiferente siempre y cuando se respete esta regla.

- La *gimbal* tiene que estar equilibrada: Es muy importante equilibrar mecánicamente todos los ejes de la *gimbal*. Para ello, se empieza equilibrando el último eje de la jerarquía, el que solo mueve la cámara, y se sigue por orden hasta el primero. Si se hiciese al contrario, el equilibrado de un eje inferior tras haber equilibrado un eje superior podría perturbar al equilibrado del primero.

- Minimizar todo lo posible la resistencia ofrecida por el cableado: Al tener que enrutar tantos cables a través de una articulación si no se es minucioso pueden ofrecer demasiada resistencia al movimiento. Para minimizar esta resistencia al máximo, se recomienda usar el mínimo diámetro de cable que cumpla con las demandas eléctricas, y enrutar el conjunto a través de las articulaciones lo más cerca al eje de rotación, si es posible, a través del mismo con motores con eje hueco, para evitar que se enrollen alrededor de la articulación.

-Limitar la inclinación del UAV en todos los ejes a lo estrictamente necesario para la navegación: Mientras más cerca se trabaje del punto de equilibrio del sistema menos se acercará a *gimbal lock*, y el sistema será más lineal por lo que el controlador lo podrá gobernar mucho más fácilmente, y se traducirá en una mejor estabilización y calidad de imagen.

-Usar motores con las características adecuadas: Los motores BLDC usados para esta aplicación deben tener el mínimo número de kv posible, por debajo de 200. También es deseable el mayor número de polos y bobinas, es decir, son preferibles motores con mucho diámetro y poco ancho para tener más torque a un bajo régimen de revoluciones.

-Construcción de una estructura robusta y precisa: La estructura de la *gimbal* debe de ser robusta para impedir deformaciones que el controlador PID tomaría como falsos errores, y perjudicaría a la calidad de la estabilización. Del mismo modo, la construcción de la estructura tiene que ser precisa para preservar una ortogonalidad perfecta entre los tres ejes, así como una buena alineación de la IMU con los mismos.

-Aislar al máximo la *gimbal* de las vibraciones del UAV: Las vibraciones aumentan la cantidad de error medido por la IMU y aunque se puedan filtrar mediante software, éstas reducen la precisión de las mediciones, y por lo tanto, la calidad de la estabilización.

Cumpliendo estas condiciones la calidad de la estabilización de la imagen está asegurada. Obviamente hay una gran parte del peso del éxito del sistema que recae en un buen software de control, y cuanto más depurado y más rápido sea mejor será la estabilización, pero con un controlador PID sencillo y una *gimbal* con las características mencionadas se puede construir un sistema con unas prestaciones muy competentes.

Este proyecto se comenzó a plantear a mediados de 2015, cuando las pocas soluciones comerciales de cargas de pago para UAV tan ligeros derivaban de versiones mucho más pesadas, diseñadas para UAV mucho más grandes y pesados adaptadas a un tamaño reducido. El problema de esto es que un UAV de gran tamaño y masa es mucho menos susceptible a las perturbaciones atmosféricas, y por ese motivo se le exige mucho menos a la estabilización de su imagen. Al trasladar esa tecnología a un UAV de tamaño ligero no es suficiente para estabilizar todas las perturbaciones, obteniendo una estabilización de la imagen mediocre. Los modelos existentes basaban su estabilización en servos, en motores “stepper”, o en estabilización digital por software.

Al finalizar esta memoria, a mediados de 2016 y con la versión definitiva de la carga de pago a punto de superar la fase de prueba para convertirse en la carga de pago oficial del UAV Mantis, cada vez son más las soluciones comerciales ajenas a Indra Systems que incorporan la tecnología de *gimbal* brushless en sus cargas de pago. Por este motivo es razonable pensar que se ha tomado el camino acertado al apostar por esta tecnología y por haber desarrollado los prototipos de una forma tan dinámica para poder llegar a tiempo al mercado.

No obstante, esta versión seguirá mejorando y actualizándose incorporando los nuevos avances que surjan en este campo. Cada vez se avanza más en la visión artificial y en la inteligencia artificial, y es muy probable que dentro de muy poco tiempo se empiece a aplicar estos avances en el sector de los UAV.

Ahora mismo un UAV requiere de uno o varios operadores para controlarlo en todo momento, y deben estar al tanto de las imágenes recibidas para filtrar los objetivos de interés en las mismas. Si los avances en visión e inteligencia artificial prosperan se podría conseguir un UAV que de forma completamente autónoma recogiese imágenes de la extensión de terreno deseada, y él mismo reconociese los objetivos de interés dentro de estas imágenes, y de éste modo mandase sólo la información importante. De este modo, haría falta menos personal para operar los UAV, o con el mismo personal se podrían manejar muchas más unidades aéreas a la vez, optimizando enormemente el rendimiento total del sistema.

A día de hoy, una de las entidades que más está avanzando en la visión artificial y la inteligencia artificial aplicada a UAV y robots es ETH Zurich. Esta universidad además se apoya de la comunidad del *open source* o código abierto, publicando la mayoría de sus avances bajo licencias de código libre. De este modo, los desarrolladores del código se benefician de los avances y pruebas que los usuarios hacen con su código, y los usuarios se benefician al usar códigos de alto rendimiento a los que si no fuese por la generosidad de esta institución sería muy complicado acceder.

El espíritu del código libre es compartir el conocimiento para que todos puedan disfrutar de él y aportar más conocimiento. De este modo el conocimiento crece a un ritmo infinitamente mayor, y de una forma mucho más rica y completa que si los resultados de las investigaciones se mantienen privados. Promoviendo el desarrollo basado en código libre todas las personas como civilización nos veremos beneficiadas a largo plazo, aunque en un sistema como el actual todavía se tenga que mantener parte de los avances de forma privada para subsistir en el mercado.



## 9- BIBLIOGRAFÍA

“Representing Attitude: Euler Angles, Unit Quaternions, and Rotation Vectors” James Diebel, Stanford University, 2006

[www.astro.rug.nl/softtar/wkapteyn/\\_downloads/attitude.pdf](http://www.astro.rug.nl/softtar/wkapteyn/_downloads/attitude.pdf)

“Euler (*gimbal lock*) Explained” The Guerrilla CG Project

[www.youtube.com/watch?v=zc8b2Jo7mno](http://www.youtube.com/watch?v=zc8b2Jo7mno)

“motor control and drive” , Microchip:

[www.microchip.com/design-centers/motor-control-and-drive](http://www.microchip.com/design-centers/motor-control-and-drive)

“Brushless DC Motors & Control - How it Works” DigitalPimple

[www.youtube.com/watch?v=ZAY5JInyHXY](http://www.youtube.com/watch?v=ZAY5JInyHXY)

“Brushless DC Motor, How it works ?” Learn Ingeniering

[www.youtube.com/watch?v=bCEiOnuODac](http://www.youtube.com/watch?v=bCEiOnuODac)

“Introduction to InstaSPIN™-BLDC Motor Control Solution” Texas Instruments

[www.youtube.com/watch?v=szgVUfyX8JM](http://www.youtube.com/watch?v=szgVUfyX8JM)

“Sensorless Control of a Brushless DC Motor” Daniel Torres, Microchip Technology Inc

[www.controlengueurope.com/article.aspx?ArticleID=33030](http://www.controlengueurope.com/article.aspx?ArticleID=33030)

“So, Which PWM Technique is Best, *Dave Wilson, Texas instruments*”

[https://e2e.ti.com/blogs\\_/b/motordrivecontrol/archive/2012/04/13/so-which-pwm-technique-is-best-part-6](https://e2e.ti.com/blogs_/b/motordrivecontrol/archive/2012/04/13/so-which-pwm-technique-is-best-part-6)

“Using the PIC18F231 for sensorless BLDC control” Padmaraja Yedamale, Microchip Technology Inc.

<http://ww1.microchip.com/downloads/en/appnotes/00970a.pdf>

“Cd-Rom 3 phase Sensored BLDC Motor Arduino Controller” blog de electrónica

<http://elecnote.blogspot.com.es/2014/11/cd-rom-3-phase-sensored-bldc-motor.html>

“Tackling the Brushless DC Motor Experience” blog sobre motores BLDC

<http://ebldc.com/?p=147>

“Accelerometer sensor”, entrada en blog de electrónica

<https://developer.tizen.org/develop-guide/native/2.3.0/org.tizen.mobile.native.appprogramming/html/guide/system/sensor.htm>

“Outrunner Disassembly and Stripping - *gimbal* Motor Rewind” Hilo en foro rcgroups

<http://www.rcgroups.com/forums/showthread.php?t=1823636>

“Simple AlexMos 8bit brushless *gimbal* controller from Viacopter” Hilo en foro rcgroups

<http://www.rcgroups.com/forums/showthread.php?t=1815204>

